

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP  
CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**PULVERIZAÇÃO FOLIAR DE ZINCO COM SILÍCIO É VIÁVEL  
AGRONOMICAMENTE PARA PLANTAS DE SORGO**

**Victor Hugo de Farias Guedes  
Engenheiro Agrônomo**

**2019**

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP  
CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**PULVERIZAÇÃO FOLIAR DE ZINCO COM SILÍCIO É VIÁVEL  
AGRONOMICAMENTE PARA PLANTAS DE SORGO**

**Victor Hugo de Farias Guedes**

**Orientador: Prof. Dr. Renato de Mello Prado**

**Coorientador: Dr. Joaquim José Frazão**

**Dissertação apresentada à Faculdade de  
Ciências Agrárias e Veterinárias - Unesp,  
Câmpus de Jaboticabal, como parte das  
exigências para a obtenção do título de  
mestre em Agronomia (Ciência do Solo)**

**2019**

G924p

Guedes, Victor Hugo de Farias

Pulverização foliar de zinco com silício é viável agronomicamente para plantas de sorgo / Victor Hugo de Farias Guedes. -- Jaboticabal, 2019

51 f. : tabs., fotos

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal

Orientadora: Renato de Mello Prado

Coorientadora: Joaquim José Frazão

1. Sorghum bicolor L.. 2. Pulverização foliar. 3. Elemento benéfico.  
I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO


TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: PULVERIZAÇÃO FOLIAR DE ZINCO COM SILÍCIO É VIÁVEL AGRONOMICAMENTE PARA PLANTAS DE SORGO

AUTOR: VICTOR HUGO DE FARIAS GUEDES

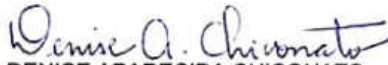
ORIENTADOR: RENATO DE MELLO PRADO

COORIENTADOR: JOAQUIM JOSÉ FRAZÃO

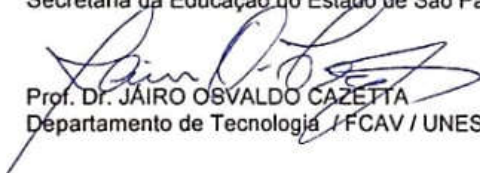
Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em AGRONOMIA (CIÊNCIA DO SOLO), pela Comissão Examinadora:



Prof. Dr. RENATO DE MELLO PRADO  
Departamento de Solos e Adubos / FCAV / UNESP - Jaboticabal



Profa. Dra. DENISE APARECIDA CHICONATO  
Secretaria da Educação do Estado de São Paulo/Escola Estadual / Ibitinga/SP



Prof. Dr. JÁIRO OSVALDO CAZETTA  
Departamento de Tecnologia / FCAV / UNESP - Jaboticabal

Jaboticabal, 17 de julho de 2019

## **DADOS CURRICULARES DO AUTOR**

**VICTOR HUGO DE FARIAS GUEDES** - nasceu em Recife, no Estado de Pernambuco, aos 07 dias de agosto de 1989. Formou-se Técnico Agrícola no ano de 2008 pela antiga Escola Agrotécnica Federal na cidade de Vitória de Santo Antão - PE. Posteriormente atuou em empresas no ramo agrícola, com ênfase em plantio florestal e crédito rural. Ingressou no curso de Agronomia do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco (IFPE), Câmpus de Vitória de Santo Antão, em 2013. Durante o período de graduação, desenvolveu experimentos na área de fertilidade do solo e nutrição de plantas no Grupo de Pesquisa Fertilidade do Solo e Agroenergia, titulando-se Engenheiro Agrônomo em 2017, com o trabalho de conclusão de curso intitulado: Comportamento de variedades de cana-de-açúcar cultivadas em diferentes níveis de amônio. Ingressou no ano de 2018 no curso de pós-graduação em Agronomia (Ciência do Solo), na Universidade Estadual Paulista – UNESP, Câmpus de Jaboticabal, fazendo parte do Grupo de Estudos em Nutrição de Plantas da UNESP (Genplant) e desenvolveu pesquisas com nutrição de plantas.

*Aos meus pais, irmãos, sobrinhos e amigos.*

**DEDICO E OFEREÇO.**

***“Só eu sei cada passo por mim dado  
nessa estrada esburacada que é a vida,  
passei coisas que até mesmo Deus duvida,  
fiquei triste, capiongo, aperriado,  
porém nunca me senti desmotivado,  
me agarrava sempre numa mão amiga,  
e de força a minha alma era munida,  
pois do céu a voz de Deus dizia assim:  
- Suba o queixo, meta os pés, confia em mim,  
vá pra luta que eu cuido das feridas.”***

*Bráulio Bessa – Poesia com rapadura*

## **AGRADECIMENTOS**

Ao Grande Arquiteto do Universo, por ser essa fonte fecunda de paz e equilíbrio em toda minha existência.

Aos meus pais, Jorge e Antonia, por todo amor e cuidado a mim dedicados, pelo apoio incondicional por toda essa jornada, dando-me totais condições de chegar até aqui. Sei que esse tempo de ausência nunca irá ser repostado, mas mesmo assim, espero que eu tenha lhes tornado orgulhos de alguma forma. Vocês são os amores de minha vida.

A meus irmãos, Dalila, Ernane, Jorge Neto e Adriana Guedes. Sobrinhos João, Brenda, e em especial as minhas crianças Júlia (Juju) e Paulo (Paulinho), creio que mesmo com a distância, as orações e cuidados comigo foram diários.

Ao meu Orientador Renato de Mello Prado, mestre incansável e presente em todas as horas.

Ao meu Coorientador José Joaquim Frazão, pela disposição em auxiliar e pela disponibilidade quando foi solicitado.

Aos professores Mara Cruz, José Carlos Barbosa, Wanderley Melo e Paulo Wadt, pelos conhecimentos adquiridos durante as disciplinas cursadas. Sem os ensinamentos das senhoras e senhores seria impossível chegar aqui.

A técnica e amiga Claudia Dela Marta (Claudinha), agradeço no auxílio das análises laboratoriais.

Ao meu ex orientador e amigo Renato Lemos dos Santos, cujos conselhos foram constantes durante essa etapa.

Aos meus amigos José de Arruda (Juca), Maria Oliveira e Nayara Rose, que saíram de Pernambuco junto comigo em buscar desse sonho.

Aos companheiros do Genplant, Kamylla Oliveira, Rafael Barreto, Gelza Teixeira, Antônio Buchelt, Jonas Souza, José Lucas, Alexander e Dillier.

Aos amigos que a Unesp me deu, Mar Roldán, Renata Sampaio, Stella Rubim, Antonio Michael, Thayane Leonel, Tamiris Marion. E em especial a Camila Cardoso, pelo apoio de todas as horas, me auxiliando em várias etapas desse processo do mestrado.



Aos companheiros da Associação de Pós-Graduação da Unesp-FCAV, vou lembrar sempre dos nossos momentos de construção de eventos e tentativa de construção do bem-estar coletivo dentro da universidade.

Enfim, a todos que ajudaram de forma direta ou indireta esse sonho acontecer.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

**A todos meu muito obrigado**

## SUMÁRIO

<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	<b>iv</b>
<b>RESUMO</b> .....	<b>vi</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>vii</b>
<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
<b>2 REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	<b>2</b>
2.1 Aspectos nutricionais das plantas de sorgo .....	2
2.2 O zinco e sua importância para as plantas .....	3
2.3 Pulverização foliar de zinco na forma de quelato.....	5
2.4 Silício na planta.....	7
2.5 Silício na mitigação de estresse por deficiência de Zn em plantas .....	9
<b>3 MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	<b>10</b>
3.1 Condições de crescimento das plantas e aplicação dos tratamentos .....	10
3.2 Avaliações Realizadas .....	13
3.2.1 Quantificação do teor de clorofila e carotenóides .....	13
3.2.2 Índice de extravasamento de eletrólitos celular .....	14
3.2.3 Produção de massa seca de parte aérea e raiz .....	14
3.2.4 Análise de silício .....	14
3.2.5 Análise de zinco.....	15
3.2.6 Determinação do teor de proteína .....	15
3.3 Análise estatística .....	15
<b>4 RESULTADO</b> .....	<b>16</b>
4.1 Acúmulo de silício e zinco.....	16
4.2 Eficiência de uso de zinco.....	17
4.3 Extravasamento celular, clorofila e carotenoide.....	17
4.4 Teor de proteína.....	19

4.5 Massa seca.....	19
<b>5 DISCUSSÃO.....</b>	<b>20</b>
<b>6 CONCLUSÃO.....</b>	<b>23</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>36</b>

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1.</b> Composição dos tratamentos na calda utilizada na pulverização foliar das plantas de sorgo.....	11
---	----

## LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.** Índice de turbidez da solução com concentrações de Zn 0; 0,60; 1,20 e 1,80 g L<sup>-1</sup> na presença de Si (+ Si) (0,50 g L<sup>-1</sup>) (a) e na ausência de Si (- Si) (0 g L<sup>-1</sup>). ..... **12**
- Figura 2.** Temperatura máxima (T máx) e mínima (T mín), e umidade relativa máxima (UR máx) e mínima (UR mín) do ar durante o desenvolvimento do experimento com sorgo. Setas identificam: emergência (1); primeira, segunda, terceira e quarta aplicações dos tratamentos ..... **13**
- Figura 3.** Acúmulo de zinco (AZN) (a) e acúmulo de silício (ASI) (b) em função das concentrações de Zn na ausência e na presença de Si (0,50 g L<sup>-1</sup>). \*\* significativo a 1% de probabilidade; \* significativo a 5% de probabilidade e não significativo. Letras diferentes diferem em relação às concentrações de Si, usando o teste t de Student. Barras nos pontos representam o erro padrão da média. .... **16**
- Figura 4.** Eficiência de uso de zinco em função das concentrações de Zn na ausência e na presença de Si (0,50 g L<sup>-1</sup>). \*\* significativo a 1% de probabilidade; \* significativo a 5% de probabilidade e não significativo. Letras diferentes diferem em relação às concentrações de Si, usando o teste t de Student. Barras nos pontos representam o erro padrão da média. .... **17**
- Figura 5.** Extravasamento celular (EE) (a), clorofila (CLO) (b), carotenoides (CAROT) (c) em função das concentrações de Zn, na ausência e presença de Si (0,50 g L<sup>-1</sup>). \*\* significativo a 1% de probabilidade; \* significativo a 5% de probabilidade e não significativo. Letras diferentes diferem em relação às concentrações de Si, usando o teste t de Student. Barras nos pontos representam o erro padrão da média. .... **18**
- Figura 6.** Teor de proteína na parte aérea (a), teor de proteína na raiz (b), em função das concentrações de Zn na ausência e na presença de Si (0,50 g L<sup>-1</sup>). \*\* significativo a 1% de probabilidade; \* significativo a 5% de probabilidade e não significativo. Letras diferem em relação às

concentrações de Si, usando o teste t de Student. Barras nos pontos representam o erro padrão da média. .... **19**

**Figura 7.** Massa seca de parte aérea (a), massa seca de raiz (b), em função das concentrações de Zn na ausência e na presença de Si ( $0,50 \text{ g L}^{-1}$ ). \*\* significativo a 1% de probabilidade; \* significativo a 5% de probabilidade e não significativo. Letras diferentes diferem em relação às concentrações de Si, usando o teste t de Student. Barras nos pontos representam o erro padrão da média. .... **20**

**Figura 1A.** Fotos da turbidez da solução com concentrações de Zn  $0 \text{ g L}^{-1}$  na presença do Si. (a), Zn  $0 \text{ g L}^{-1}$  na ausência do Si. (b); Zn  $0,60 \text{ g L}^{-1}$  na presença do Si. (c), Zn  $0,60 \text{ g L}^{-1}$  na ausência do Si. (d); Zn  $1,20 \text{ g L}^{-1}$  na ausência do Si. (e), Zn  $1,20 \text{ g L}^{-1}$  e na presença do Si (f); Zn  $1,80 \text{ g L}^{-1}$  na ausência do Si. (g), Zn  $1,80 \text{ g L}^{-1}$  na presença do Si (h) realizadas 180 min após a formação da solução..... **36**

**Figura 2A.** Fotos das plantas de sorgo nas concentrações Zn 0 (a), 0,60 (b); 1,20 (c), e 1,80  $\text{g L}^{-1}$  (d) na ausência do Si e 0 (e), 0,60 (f); 1,20 (g) e 1,80  $\text{g L}^{-1}$  (h) na presença do Si ( $0,50 \text{ g L}^{-1}$ ) realizada no final do experimento. **37**

## **PULVERIZAÇÃO FOLIAR DE ZINCO COM SILÍCIO É VIÁVEL AGRONOMICAMENTE PARA PLANTAS DE SORGO**

**RESUMO** - A pulverização foliar de silício (Si) pode diminuir os efeitos da deficiência de zinco (Zn) nas plantas, pois a adição de Si e de Zn na calda pode aumentar a eficiência da adubação foliar, porém os efeitos em plantas de sorgo ainda não são conhecidos. Assim, objetivou-se avaliar a aplicação foliar de Si na ausência de Zn e com a adição na calda em plantas de sorgo e seus efeitos na nutrição e no desenvolvimento das plantas. O delineamento foi em esquema fatorial 4 x 2, com cinco repetições, tendo quatro concentrações de Zn, na forma de Zn-EDTA: 0; 0,60; 1,20 e 1,80 g L<sup>-1</sup> e na ausência e na presença de Si (0,50 g L<sup>-1</sup>) na calda. Avaliou-se o acúmulo de Zn e Si, eficiência de uso de Zn, extravasamento de eletrólitos celular, teores de clorofila, carotenoides, proteína e a massa seca de parte aérea e de raiz. Nas plantas deficientes em Zn, a pulverização foliar de Si ao aumentar o acúmulo deste elemento na planta diminuiu o extravasamento de eletrólitos celular, aumentou o conteúdo dos pigmentos fotossintéticos e incrementou a produção de massa seca da parte aérea e de raiz. A pulverização foliar de Zn na forma de quelato com adição de Si na calda, em relação a sua ausência, aumentou o acúmulo de Zn na planta, o teor dos pigmentos fotossintetizantes, o teor de proteína e a produção de massa seca de raiz. Conclui-se que a pulverização foliar de Si alivia a deficiência de Zn, e a adição de Si na calda com o Zn é viável agronomicamente para plantas de sorgo.

**Palavras-chave:** *Sorghum bicolor* L., quelato de zinco, silicato de potássio, pulverização foliar, elemento benéfico.

## FOLIAR ZINC SPRAY WITH SILICE IS AGRONOMICALLY VIADABLE FOR SORGHUM PLANTS

**ABSTRACT** - Foliar spraying of silicon (Si) can decrease the effects of zinco (Zn) deficiency on plants. While the addition of Si and Zn in the solution may increase the efficiency of foliar fertilization with this micronutrient, however the effects on sorghum plants are not yet known. The objective of this study was to evaluate the foliar application of Si in the absence of Zn and with the addition of different concentrations of Zn in sorghum plants and their effects on plant nutrition and development. The experiment was carried out in a 4x2 factorial scheme with five replicates having four concentrations of Zn as Zn-EDTA: 0.60, 1.20 and 1.80 g L<sup>-1</sup> and in the absence and presence of Si (0.50 g L<sup>-1</sup>) in solution. Zn and Si accumulation, Zn use efficiency, cellular electrolyte leakage, chlorophyll content, carotenoids, protein content and shoot and root dry mass were evaluated. In the plants deficient in Zn, a foliar spraying of Si increasing the accumulation of this element in the plant, decreased the cellular extravasation and increased the photosynthetic pigments and the dry mass production of shoot and root. Foliar spraying of Zn in the chelate form with addition of Si in relation to its absence increased the accumulation of Zn in the plant, the content of photosynthetic pigments, protein content and root dry mass production. It is concluded that foliar spraying of Si alleviates Zn deficiency and the addition of Si in the solution with Zn is agronomically viable for sorghum plants.

**Keywords:** *Sorghum bicolor* L., zinc chelate, potassium silicate, leaf spray, beneficial element.



## 1 INTRODUÇÃO

O zinco (Zn) é um dos oito micronutrientes para as plantas, fazendo parte do grupo químico dos metais e participa de diversos processos metabólicos como: aumento da taxa fotossintética, dos teores de clorofila e promove a manutenção da estrutura dos cloroplastos (Alloway, 2008). O crescimento e o desenvolvimento das plantas podem ser prejudicados sob condições de deficiência de Zn, especialmente o *Sorghum bicolor* L., espécie sensível a essa desordem nutricional. A deficiência deste micronutriente pode induzir, inclusive, o estresse oxidativo, incrementando o extravasamento celular, diminuindo a produção de pigmentos (Hafeez et al., 2013), a síntese de proteína (Marschner, 2012), e conseqüentemente, o acúmulo de matéria seca (Alloway, 2008), prejudicando o desenvolvimento das plantas de sorgo (Prado et al., 2008).

Uma alternativa para o fornecimento de Zn é a aplicação via foliar de fontes de Zn solúveis e estáveis na forma de quelato. O complexo Zn-EDTA pulverizado nas folhas é absorvido na forma quelatada e transportado nesta forma, provavelmente devido à alta estabilidade deste complexo em comparação com outros ácidos orgânicos (Doolette et al., 2018), podendo atingir as raízes (Haslett et al., 2001), promovendo incremento na produção de clorofila (Sourestani e Ansari, 2017), carotenoides (Kandoliya et al., 2018) e a maior produção de massa seca da raiz, em plantas de feijão (Mahdieh et al., 2018) e de tâmara (Mohammadi e Khezri, 2018).

O fornecimento do Silício (Si), elemento benéfico, pode mitigar os efeitos do estresse por deficiência de Zn em planta de soja (Pascual et al., 2016). Isso ocorre porque o Si aumenta a ação antioxidante a partir de compostos não enzimáticos, como o carotenóide, evitando a degradação da clorofila (Kim et al., 2017). Entretanto, nesse trabalho, o Si foi fornecido via solução nutritiva, não tendo informações do papel deste elemento benéfico pulverizado nas folhas e sua relação com a nutrição do Zn em plantas de sorgo. O emprego da pulverização foliar de Zn e Si na mesma calda é inédito na agricultura, tendo a vantagem de otimizar em apenas uma operação as aplicações dos dois elementos químicos. No entanto, o Si pode polimerizar induzido pela presença de metais catiônicos, como  $Zn^{+2}$  em solução, prejudicando a absorção do micronutriente (Laane, 2017).

Há a hipótese de que os benefícios do Si via foliar aconteçam pela diminuição do estresse, incrementando o teor de carotenoide e de clorofila em plantas de batata (Pilon et al., 2013), então, poderiam também diminuir os efeitos da deficiência de Zn nas plantas de sorgo, favorecendo a produção de massa seca. A outra hipótese é que a pulverização de Zn com adição de Si na calda, em relação à ausência do elemento benéfico, não prejudica a absorção foliar do Zn e ainda promove incremento dos pigmentos fotossintetizantes e a produção de massa seca da planta. Sendo aceitas essas hipóteses, surge uma nova estratégia para potencializar os efeitos da adubação foliar de Zn nos cultivos a partir da adição de Si na calda de pulverização.

Assim, objetivou-se avaliar a aplicação foliar de Si na ausência de Zn e com a adição na calda em plantas de sorgo e seus efeitos na nutrição e no desenvolvimento das plantas.

## **2 REVISÃO DE LITERATURA**

### **2.1 Aspectos nutricionais das plantas de sorgo**

O sorgo (*Sorghum bicolor* L.) é um dos principais cereais produzidos em muitas partes do mundo (Rooney, 2018), atrás apenas da cevada, do milho, do arroz e do trigo. O seu consumo é maior por grande parte da população dos países pobres da África e Ásia; contudo, em países mais desenvolvidos, suas sementes processadas estão sendo utilizadas como fonte de proteína (Duarte, 2010). No Brasil, o sorgo vem aumentando sua área cultivada e sua produção ao longo dos anos, sendo que a produção da safra 2018, até abril de 2019, foi de 2.277,9 mil toneladas, em que o Estado de São Paulo foi responsável por 40,2 mil toneladas (CONAB, 2019). Porém, a produtividade ainda é baixa, levando-se em consideração o potencial produtivo da cultura. Entre as principais causas, está a falta de tecnificação nos plantios, o uso de cultivares cada vez mais exigentes em nutrientes e pouco adaptadas às condições edafoclimáticas da região de cultivo e ao baixo consumo de fertilizantes e corretivos agrícolas (Santos et al., 2018).

As plantas de sorgo são altamente responsivas à correção do pH do solo e à adubação, apesar da rusticidade dessa cultura (Rabelo et al., 2012). A extração de nutrientes pela cultura é aumentada em função das maiores produções de biomassa, tendo como nutrientes mais exigidos o nitrogênio (N) e o potássio (K); seguidos pelo fósforo (P); cálcio (Ca); magnésio (Mg) e enxofre (S), ferro (Fe), manganês (Mn), Zn, boro (B), cobre (Cu), molibdênio (Mo) e níquel (Ni) (Santi et al., 2005; Franco et al., 2011).

Os micronutrientes apesar da baixa exigência podem ter alta resposta da planta à sua aplicação, portanto, pode ter alta taxa de retorno da adubação. O sorgo é considerado uma planta sensível à deficiência de Zn, embora a extração não seja alta ( $15,9 \text{ g t}^{-1}$ ) (Santos et al., 2009). A resposta das plantas à aplicação de Zn em regiões tropicais é alta devido a sua baixa disponibilidade em solos no mundo (Alloway, 2008). A maior parte do Zn total no solo não está prontamente disponível para as plantas por estar adsorvida em partículas de argilas ou em compostos orgânicos (Prado, 2008). Um dos fatores mais relevantes que afetam o teor de Zn disponível no solo é o valor pH, onde o aumento deste índice devido à calagem excessiva diminui a disponibilidade do micronutriente e também o uso excessivo de adubos fosfatados solúveis (Kabata-Pendias, 2011). Por esse motivo, mais da metade das culturas agrícolas apresenta deficiência de Zn (Swamy et al., 2016; Lee et al., 2017).

É importante a adubação com esse micronutriente para atender à exigência nutricional da cultura do sorgo, podendo ser realizada via solo, foliar e tratamento de sementes. A pulverização foliar de Zn é uma alternativa, por aumentar o rendimento desta cultura (Soleymani e Shahrajabian, 2012) utilizando baixas concentrações do micronutriente na aplicação, o que reduz podendo os custos da fertilização dos cultivos.

## **2.2 O zinco e sua importância para as plantas**

Os sintomas principais da deficiência de Zn seriam a diminuição do crescimento internodal, podendo apresentar crescimento rosetado na parte aérea, as folhas podem ter atraso no desenvolvimento e ficar retorcidas e com rugas (Taiz

e Zeiger, 2015). Na cultura do sorgo, as plantas apresentam além dos sintomas citados, o avermelhamento das nervuras centrais e laterais das folhas e estrias avermelhadas no colmo e nas folhas mais velhas pode ocorrer necrose avermelhada ao longo das laterais do limbo e também podem surgir manchas avermelhadas entremeadas com manchas marrons. (De Lima Filho, 2014).

Essa desordem nutricional por deficiência de Zn, que ocorre em nível de tecido, deve-se inicialmente ao metabolismo alterado, principalmente pelo desbalanço nas espécies Reativas de Oxigênio (ERO). As ERO são um grupo de radicais livres, de moléculas reativas e de íons que são derivados do  $O_2$ , entre os quais: radical superóxido ( $O_2^-$ ), oxigênio "singlet" ( $^1O_2$ ), radical hidroxila ( $OH\bullet$ ) e peróxido de hidrogênio ( $H_2O_2$ ) (Sharma et al., 2004; Apel e Hirt, 2004). A acumulação de ERO nas células pode resultar na rápida oxidação de macromoléculas biológicas, tais como ácidos nucleicos, proteínas e lipídeos (Reddy et al., 2005; Yadav, 2010). Pode provocar o vazamento de eletrólitos da célula causando sua morte (Aaron et al., 2014).

Por sua vez, plantas em estado nutricional adequado em Zn possuem melhor funcionamento das isoenzimas superóxido dismutase e catalase, as quais agem como sistemas de varredura para erradicar ERO tóxicas, de modo a proteger as biomembranas, o DNA (Sun et al., 2019), a clorofila e os carotenoides (Khan et al., 2016), e as proteínas (Kirkby e Römheld, 2007). As proteínas têm a resistência de degradação aumentada em sorgo quando submetidas à presença de metais como Cu e Zn. Isso porque, se aumenta a atividade da enzima desidrogenase de lactato, bem como, se diminui a atuação da tripsina, que pode degradar completamente as proteínas (Halder et al., 2016).

Em plantas de milho foi observado que a aplicação de quantidades adequadas de Zn em plantas de milho aumentou o conteúdo de clorofila nas folhas, incrementando a fotossíntese (Liu et al., 2016). Em algumas plantas cultivadas na ausência de Zn, foi verificado que a produção de clorofila diminuiu em 100% em plantas de feijão (Samreen et al., 2017), e em 50% em plantas de cítrus (Fu et al., 2012) em comparação a plantas nutridas com esse micronutriente.

Os resultados apresentados por Singh et al. (2017) revelaram que a aplicação foliar de Zn (30 ppm) em plantas de batata aumentou significativamente o teor de

carotenoides, a massa seca de raiz e o teor de proteína bruta, quando comparado com o controle. Resultados ainda não evidenciados em plantas de sorgo. Assim, plantas com estado nutricional adequado de Zn apresentam volume de raiz diferenciado proporcionando maior produtividade (Pacholczak e Szydlo, 2008).

Estes efeitos benéficos do Zn na raiz devem-se ao fato de que o micronutriente promove a biossíntese do ácido indolacético (AIA), resultando na relação de troca auxina/citocinina que aumenta a produção de raiz (Pacholczak e Szydlo, 2008). Salienta-se que o aumento da síntese do AIA ocorre na planta porque o Zn é primordial para a síntese do triptofano, o precursor deste hormônio (Taiz e Zeiger, 2015).

O fornecimento de Zn nas plantas é muito importante para seu crescimento. Para melhorar a nutrição das plantas com Zn é importante o uso de fontes solúveis e eficientes, tendo opção de formas queladas que, por vezes, produzem resultados superiores a fontes de sais como o sulfato de zinco ( $ZnSO_4$ ) (Tian et al., 2015; Pipiška et al., 2008).

### **2.3 Pulverização foliar de zinco na forma de quelato**

As pulverizações foliares de produtos contendo micronutrientes são cada vez mais usadas na agricultura moderna, porém sem conhecimento aprofundado e embasamento científico sobre fontes e quantidades a serem utilizadas nesse processo (Canesin e Buzetti, 2007). As folhas das plantas possuem ampla capacidade de absorção de nutrientes aplicados na forma de soluções em sua superfície. Esse conhecimento motivou o desenvolvimento das tecnologias de aplicação foliar em forma de soluções contendo macronutrientes e micronutrientes (Wang et al., 2015; Nascente et al., 2017; Oliveira et al., 2019), e as aplicações são feitas geralmente nas formas de ácidos, óxidos, sais e quelatos.

Em um dos primeiros trabalhos com pulverização foliar de Zn em gramíneas, Galvão (1994) verificou que o  $ZnSO_4$ , quando aplicado via foliar em forma de solução a 1%, por três aplicações, não apresentou diferença significativa na produção de grãos de milho, em relação ao fornecimento via semente, a lanço ou na aplicação em sulcos. Foi observado também por Orioli Júnior et al. (2008), que a aplicação

foliar de Zn em plantas de trigo favoreceu o acúmulo do nutriente em relação a outros modos de aplicação. Isso pode ter ocorrido, pois cargas negativas prevalecem na parede celular e na cutícula foliar, estabelecendo, da mesma forma como ocorre no solo, uma capacidade de troca de cátions (CTC) maior que a capacidade de ânions (CTA), favorecendo a absorção do  $Zn^{2+}$  (Malavolta, 2006).

Em plantas de sorgo, a aplicação foliar de fontes inorgânicas como o  $ZnSO_4$  e óxido de zinco (ZnO) proporciona incrementos no acúmulo de Zn (Choudhary et al., 2017), no teor de clorofila e de proteínas (Rana et al., 2013; Choudhary et al., 2015), na atividade enzimática (Kumar et al., 1988), na massa seca da parte aérea e da raiz (Dambiwal et al., 2017; Katkar et al., 2017), refletindo na maior produção (Rana et al., 2013; Dimkpa et al., 2017). As fontes de Zn inorgânicas geralmente são mais utilizadas pelo menor custo, maior disponibilidade para compra no mercado e devido ao pouco conhecimento do produtor de outras fontes alternativas.

Uma fonte alternativa de Zn seria na forma de quelatos sintéticos. A palavra quelato deriva da palavra grega “chela” ou “garra” e descreve a complexação de um agente quelante com um cátion metálico através de ligações coordenadas formando uma estrutura coesa (Montalvo et al., 2016). Sendo assim, consideradas como fontes mais eficientes, por apresentar alta estabilidade e solubilidade, constituindo uma das principais vantagens dessa fonte, permitindo que micronutrientes como, Fe, Mn, Cu e Zn, mantenham-se disponíveis para a absorção (Hafeez et al., 2013; Qadir et al., 2014; Gonçalves et al., 2017). O quelato de Zn tem em sua composição de 5 a 14% de Zn, e é oferecido comumente nas formas de DTPA e EDTA (Burt et al., 1995).

Em virtude dos benefícios dos quelatos como fonte de micronutrientes, houve rápido progresso na tentativa de elucidação do papel dos quelatos de Zn na melhoria dos aspectos produtivos em diversas culturas: feijão, milho, soja e trigo (Peruchi, 2009), sorgo (Soleymani e Shahrajabian, 2012), tabaco (Pipíška et al., 2008) e feijão (García et al., 2019).

Por exemplo, em trabalho realizado por Malavolta et al. (1993) foi evidenciado em plantas de café que receberam aplicado via foliar com o quelato de Zn que a absorção do nutriente foi maximizada, sendo translocado para outros órgãos em maior proporção que as fontes minerais. Estudos em diferentes culturas indicam que

a pulverização foliar de quelato de Zn na concentração de 250 g ha<sup>-1</sup>, em plantas de milho e de feijão, promoveu maior teor de Zn nas suas folhas (Peruchi, 2009).

Em experimento realizado com quelato de Zn em variedades de trigo, foi verificado que a aplicação de 4 kg/ha<sup>-1</sup> aumentou a produção de sementes nas plantas avaliadas (Dargahi et al., 2014). Alvarez et al. (2019) observaram, que a aplicação foliar de Zn na concentração 2 g L<sup>-1</sup> na forma de quelato, em plantas de arroz, favoreceu o acúmulo em relação de outras fontes, como o óxido de Zn nanoparticulado e o nitrato de Zn estabilizado com sorbitol. Outro estudo com a aplicação do quelato de Zn via foliar na concentração 1.000 ppm, em plantas de tâmara, verificou incremento dos teores de clorofila e de proteína, o que refletiu no crescimento vegetativo da planta (Mohammadi e Khezri, 2018).

Uma nova estratégia para melhorar a eficiência da nutrição com Zn nas plantas seria seu fornecimento associado com Si, sobretudo em sorgo, embora não sejam conhecidos os efeitos dessa associação no desenvolvimento e acúmulo de nutrientes nesta planta. Assim, a relação do Si e seus efeitos na mitigação de deficiência de Zn e na potencialização da resposta da planta à aplicação do micronutriente via foliar serão abordados em um item exclusivo (2.5).

## **2.4 Silício na planta**

Diante da possível relação do Zn com o Si, será abordada inicialmente a importância do Si nas plantas. O Si é absorvido pelas plantas na forma de ácido monossilícico (H<sub>4</sub>SiO<sub>4</sub>) (Korndörfer, 2007). A fonte solúvel mais utilizada para compor a solução nutritiva em cultivos hidropônicos ou para a pulverização foliar é o silicato de potássio (K<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>). O silicato de potássio em meio ácido induz reações de dissociação e de hidrólise, gerando no final o H<sub>4</sub>SiO<sub>4</sub> (Lopes et al., 2011).

Além do pH, outros fatores podem influenciar na reação de polimerização de silicatos, entre eles a associação do Si com óxidos metálicos (Tabaña e Heckman, 2015) e com cátions; porém, o uso de estabilizantes, tal como o sorbitol, na solução ou na calda, proporciona diminuição da reação de polimerização (Kubicki e Heaney, 2003; Felisberto, 2018) devido ao aumento da estabilidade do Si em solução. Além disso, os estabilizantes possuem propriedades umectantes, que diminuem a

evaporação da gota na superfície foliar aumentando o tempo para a absorção deste elemento pelas folhas (Babiker e Duncan, 1974)

As plantas apresentam diferenças em sua capacidade de acúmulo desse elemento, podendo ser classificadas em: acumuladoras, onde estão incluídas espécies da família das Poaceae como cana-de-açúcar, arroz, milho e sorgo. Dentre as não acumuladoras, as Eudicotiledôneas como a soja e o feijão são incapazes de absorver e de acumular alta quantidade de Si (Ma e Yamaji, 2006).

Apesar de diversos estudos e de ser o segundo elemento mais abundante na crosta terrestre, o Si ainda não é considerado nutriente para as plantas superiores. Contudo, seus efeitos benéficos promovem mitigação tanto de estresses bióticos (Reynolds et al., 2016; Wang et al., 2017) quanto abióticos (Maksimovic et al., 2012; Rizwan et al., 2015; Coskun et al., 2016; Yin et al., 2016; Timotiwu et al., 2017).

Quando submetidas a esses estresses, plantas supridas com Si já demonstraram maior capacidade de suportar as perturbações fisiológicas. Isso provavelmente se deve à melhoria no sistema antioxidante, especificamente com a ação de enzimas como a dismutase do superóxido (SOD) e a glutathione redutase (GRS) (Curvelo et al., 2013). Durante as condições de estresse abiótico, a aplicação de Si mostra-se eficiente na eliminação das ERO, ativando componentes do sistema de defesa das plantas, que são enzimas como a catalase (CAT) e a ascorbato peroxidase (APX) que estão envolvidos na conversão de  $H_2O_2$  em água ( $H_2O$ ), e na ativação da segunda linha de defesa das plantas, que são os carotenóides (Kim et al., 2017). A ativação tem dependência direta da intensidade do estresse e do tipo de planta (Gowayed et al., 2017). A importância dos carotenóides é destacada, pois, com a diminuição de seus teores, a clorofila não é protegida contra danos e, conseqüentemente, acontece redução da fotossíntese (Singh et al., 2011).

Além disso, a ativação desses componentes de defesa pode prevenir a peroxidação de lipídios e das membranas dos tilacoides nas plantas (Fryer, 1992). Isso foi verificado em plantas de mamona sob estresse salino que tiveram diminuição do extravasamento de eletrólitos celular quando receberam Si (Ferraz et al., 2015). Em plantas de milho sob estresse por excesso de Cd, o acréscimo de Si aumentou a resistência da parede celular, diminuindo dano à cultura (Kollarova et al., 2019).



Foi observado por Shedeed (2018), ao promover aplicações periódicas de silicato de potássio em plantas de milho, que houve aumento no teor de clorofila. Este aumento é devido à capacidade do Si em melhorar os aspectos morfológicos e a longevidade dos cloroplastos (Balakhnina e Borkowska, 2013), bem como, proporcionam muitos benefícios ao melhorar a estrutura das plantas e ao maximizar a eficiência fotossintética (Ahmad et al., 2013). Além disso, oferece vantagens na aplicação agrícola, tendo aumento do crescimento e da produtividade, pois minimiza o estresse hídrico e fornecem resistência ao estresse nutricional.

Até o momento foi encontrado apenas um relato sobre a resposta de plantas de sorgo à pulverização foliar com Si na forma de silicato de potássio onde foi observado aumento do acúmulo do elemento, o teor de clorofila e a massa seca da parte aérea e da raiz (Flores et al., 2018).

## **2.5 Silício na mitigação de estresse por deficiência de Zn em plantas**

Na literatura, existem diversos trabalhos que relacionam o Si à mitigação do estresse por toxicidade de Zn (Seraji et al., 2017; Gu et al., 2012; Bokor et al., 2014). E também há relatos de efeitos benéficos da associação de micronutrientes com Si na mitigação do estresse por deficiência em plantas cultivadas (Gonzalo et al., 2013, Pavlovic et al., 2013; Bityutskii et al., 2014). Entretanto, mesmo sabendo que os depósitos de Zn na planta podem ser usados sob condições de deficiência deste nutriente, a relação entre a adição de Si e o teor de quelantes de Zn, responsáveis pela distribuição de metais dentro da planta, ainda não foi elucidada (Hernández-Apaolaza, 2014).

Em trabalho realizado por Pascual et al. (2016), verificaram inicialmente que existe relação direta da aplicação do Si mais o Zn quelatado, aplicados via solução nutritiva, com a mitigação de deficiência de Zn em plantas de soja. No fornecimento de Si na concentração de 0,5 mM, o Zn presente no apoplasto radicular foi remobilizado de forma mais efetiva dentro da planta sob insuficiência. Esta remobilização e distribuição evitaram os sintomas de deficiência de Zn. Observou-se ainda que a ausência do Si na solução nutritiva diminuiu a produção de clorofila, demonstrando assim que o Si não é só indispensável para diversas enzimas, mas

também atua no desenvolvimento e na formação adequada dos cloroplastos necessários para a produção de pigmentos.

Na associação do Zn com Si na cultura do arroz, aplicados via solução nutritiva, usando-se o  $ZnSO_4$ , verificou-se efeitos benéficos relacionados à maior absorção de Zn. Essa absorção proporcionou um melhor desenvolvimento de todas as partes vegetativas das plantas, assim como o aumento dos teores de cálcio, potássio, fósforo e boro (Mehrabanjoubani et al., 2015).

Atualmente, a interação Si e Zn ainda não é conhecida para a cultura do sorgo, sobretudo quanto ao uso do quelato de Zn como fonte e sua aplicação via foliar. Porém, é importante ressaltar que o Si não atua como substituto de nutrientes, mas, em alguns casos, mitiga prejuízos causados pela deficiência nutricional.

### **3 MATERIAL E MÉTODOS**

#### **3.1 Condições de crescimento das plantas e aplicação dos tratamentos**

O experimento foi desenvolvido em casa de vegetação, no período de julho a novembro de 2018. Utilizou-se delineamento inteiramente casualizado, em esquema fatorial 4x2, com 5 repetições. Os tratamentos foram constituídos por quatro concentrações de Zn na forma de Zn-EDTA (0,0; 0,60; 1,20 e 1,80 g L<sup>-1</sup>) e duas concentrações de Si (0 e 0,50 g L<sup>-1</sup>). Foi utilizado como fonte de Si o silicato de potássio estabilizado (128 g L<sup>-1</sup> de Si e 126 g L<sup>-1</sup> de K<sub>2</sub>O). As concentrações de potássio nas parcelas sem Si foram equilibradas com cloreto de potássio (KCl).

Utilizaram-se vasos plásticos preenchidos com 7 dm<sup>3</sup> de areia, a qual foi lavada seguindo metodologia proposta por De Lima Filho et al. (2018). Posteriormente, realizou-se a semeadura de sementes de sorgo da cultivar DOW 1G244, e quando as plantas atingiram o estágio fenológico V3, foi realizado o desbaste mantendo uma planta por vaso. Diariamente, as plantas receberam a solução nutritiva de Hoaglan e Arnon (1950), excluindo-se o Zn. A solução nutritiva foi fornecida após a emergência das plântulas, inicialmente com 10% da força iônica, aumentando a cada semana para 20%, 40%, 60% até 70% e, assim, mantida até o final do experimento. O valor

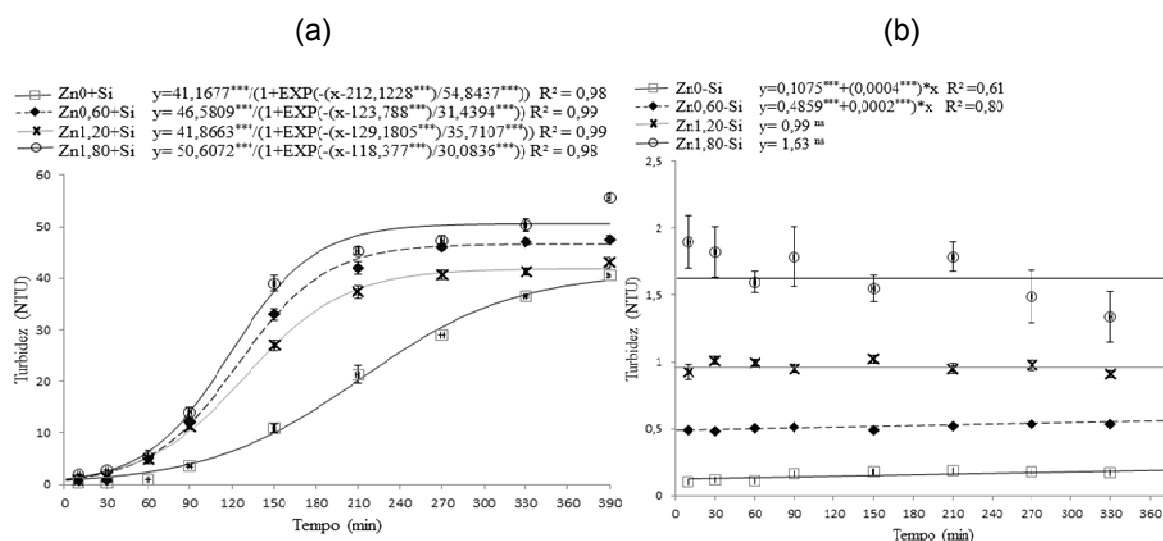
pH da solução nutritiva foi ajustado para  $5,5 \pm 0,1$  com a utilização de solução de HCl ( $1,0 \text{ mol L}^{-1}$ ) ou NaOH ( $1,0 \text{ mol L}^{-1}$ ).

As pulverizações foram realizadas com pulverizador manual, em quatro estágios fenológicos: V4, V6, V8 e V10. Inicialmente, foram preparadas duas soluções: a de Zn e a de Si. A solução de Si estabilizado foi preparada a partir da mistura de silicato de potássio (Diatom<sup>®</sup>) com estabilizante sorbitol, na proporção 9:1 (v/v). Já a solução de Zn foi preparada a partir de quelato de Zn (QuelMax - Zn<sup>®</sup>) (Zn: 14%) com estabilizantes sorbitol, ácido fúlvico, ácido salicílico e água deionizada. A partir dessas duas soluções, foram preparados os tratamentos (Tabela 1).

**Tabela 1.** Composição dos tratamentos na calda utilizada na pulverização foliar das plantas de sorgo.

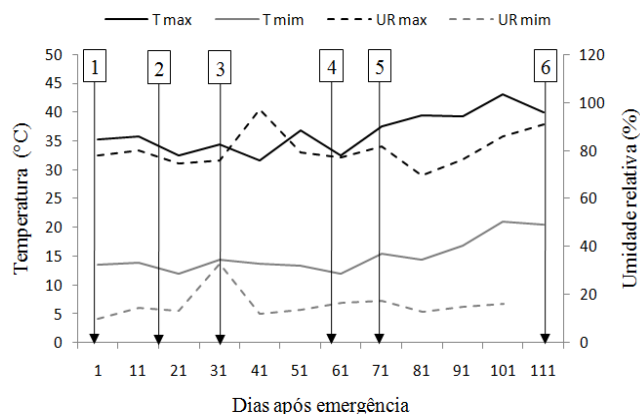
Tratamentos	Composição
Concentração 0 de Zn na ausência de Si	Água deionizada + KCl
Concentração 1 de Zn na ausência de Si	$0,60 \text{ g L}^{-1}$ da solução de zinco estabilizado + KCl
Concentração 2 de Zn na ausência de Si	$1,20 \text{ g L}^{-1}$ da solução de zinco estabilizado + KCl
Concentração 3 de Zn na ausência de Si	$1,80 \text{ g L}^{-1}$ da solução de zinco estabilizado + KCl
Concentração 0 de Zn na presença de Si	$0,50 \text{ g L}^{-1}$ solução de SiK estabilizado
Concentração 1 de Zn na presença de Si	$0,60 \text{ g L}^{-1}$ da solução de zinco estabilizado + $0,50 \text{ g L}^{-1}$ da solução de SiK estabilizado
Concentração 2 de Zn na presença de Si	$1,20 \text{ g L}^{-1}$ da solução de zinco estabilizado + $0,50 \text{ g L}^{-1}$ da solução de SiK estabilizado
Concentração 3 de Zn na presença de Si	$1,80 \text{ g L}^{-1}$ da solução de zinco estabilizado + $0,50 \text{ g L}^{-1}$ da solução de SiK estabilizado

No momento das pulverizações, foram realizados ajustes do valor pH da calda para  $7,0 \pm 0,1$  com a utilização de solução HCl ( $1,0 \text{ mol L}^{-1}$ ) ou NaOH ( $1,0 \text{ mol L}^{-1}$ ). Realizou-se a avaliação da homogeneidade das caldas dos tratamentos a partir do índice de turbidez medido com auxílio do turbidímetro digital (TECNOPON/TB1000) durante 390 minutos (Figura 1ab). Observou-se que o índice de turbidez nas caldas contendo Zn e Si (Figura 1a) mantiveram-se estáveis dos 60 aos 200 minutos e diminuindo esse incremento após esse período. E nas caldas contendo apenas o Zn observou-se aumento da turbidez em função das maiores concentrações de Zn utilizadas (Figura 1b). As caldas foram aplicadas nas plantas até 20 minutos após o seu preparo.



**Figura 1.** Índice de turbidez da solução com concentrações de Zn 0; 0,60; 1,20 e 1,80  $\text{g L}^{-1}$  na presença de Si (+ Si) ( $0,50 \text{ g L}^{-1}$ ) (a) e na ausência de Si (- Si) ( $0 \text{ g L}^{-1}$ ).

A temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ) 23,5, 20, 20,1 e 18,9 e a umidade relativa do ar (%) 59, 75, 68 e 85 foram medidas durante a primeira, segunda, terceira e quarta pulverizações foliares, respectivamente (Figura 2.). As plantas receberam 2,0, 3,0, 4,0 e 5,0 mL de calda por planta para a primeira, segunda, terceira e quarta pulverizações foliares. Durante as aplicações cobriu-se a superfície da areia do vaso para se evitar a absorção de Si da solução pelas raízes.



**Figura 2.** Temperatura máxima (T máx) e mínima (T mín), e umidade relativa máxima (UR máx) e mínima (UR mín) do ar durante o desenvolvimento do experimento com sorgo. Setas identificam: emergência (1); primeira, segunda, terceira e quarta aplicações dos tratamentos

## 3.2 Avaliações Realizadas

### 3.2.1 Quantificação do teor de clorofila e carotenóides

Aos 110 dias após a emergência (DAE) avaliou-se os teores de clorofila e carotenóides, seguindo a metodologia de Lichtenthaler e Buschmann (2001). Coletou-se o terço médio excluindo a nervura central da folha +1, que é a primeira folha com bainha visível a partir do ápice. Posteriormente as amostras coletadas foram protegidas com papel alumínio (lado fosco) e inseridas em caixas térmicas contendo gelo, e levadas ao laboratório. No laboratório, as amostras foram fracionadas com aproximadamente 1 mm, pesaram-se 0,1 g da matéria fresca, que foram postas em recipientes na ausência de luz e adicionado 10 mL de acetona a 80% para incubação, sob refrigeração, por 24 horas. A clorofila total foi determinada na solução incubada por meio de leituras em espectrofotometria nos comprimentos de onda 663 nm e 647 nm para clorofila a e b, respectivamente. E o teor de carotenóide no comprimento de onda de 470 nm.

### 3.2.2 Índice de extravasamento de eletrólitos celular

Para a análise do extravasamento celular foram retirados cinco discos foliares por planta de área média de 113mm<sup>2</sup> cada, posteriormente lavados e colocados em béqueres juntamente com 20 mL de água deionizada. Após fechadas, as placas foram acondicionadas à uma temperatura de 25°, por 90 minutos em seguida, a aferição será realizada em condutividade inicial do meio (Xi) usando condutivímetro. Posteriormente as placas foram submetidas à temperatura de 80°C, por 90 minutos, em estufa de secagem e, após resfriamento, foi conferida a condutividade final (Xf). O extravasamento de eletrólitos foi expresso como a porcentagem de condutividade em relação à condutividade total após o tratamento por 90 minutos a 80° C:  $[(Xi/Xf) \times 100]$  (Scotti Campos e ThuPhamThi, 1997).

### 3.2.3 Produção de massa seca de parte aérea e raiz

Aos 111 DAE, as plantas foram cortadas, separando em parte aérea e raiz. A parte aérea foi lavada com água, em seguida com solução a 0,3 % de detergente, solução a 0,1 mmol L<sup>-1</sup> de HCl e duas vezes com água deionizada (Prado, 2008). O sistema radicular foi lavado com água para a retirada da areia. Posteriormente, as plantas foram secas em estufa de circulação forçada de ar (65±5°C) até atingirem massa constante, e foi determinada a massa seca da parte aérea e da raiz com pesagem em balança de 0,01g de precisão.

### 3.2.4 Análise de silício

Após a secagem, a parte aérea foi moída em moinho tipo Wiley para a determinação do teor de Si, segundo método descrito por Korndörfer et al. (2004), pelo método da digestão úmida, usando-se H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> e hidróxido de sódio (NaOH), elevando-se a temperatura em estufa de circulação de ar a 120°C por 4 horas para induzir a reação. E determinação do teor de Si foi realizada por espectrofotômetro a 410 nm, pelo método de colorimetria com ácido clorídrico, ácido oxálico e molibdato

de amônio. Com base no teor e na massa seca, calculou-se o acúmulo do elemento na parte aérea das plantas.

### **3.2.5 Análise de zinco**

O teor de Zn foi determinado segundo método descrito por Bataglia et al. (1983). O tecido vegetal foi solubilizado pela via úmida através da digestão nítricoperclórica e a determinação realizada após diluição das amostras por espectrometria de absorção atômica. O acúmulo de Zn na planta foi calculado a partir do produto da massa seca da parte aérea e pelo teor de Zn na planta. Realizou-se o cálculo da eficiência de uso de Zn conforme indicação de Siddiqi e Glass (1981), que foi o produto da matéria seca de parte aérea produzida pela planta, pelo acúmulo total do nutriente também na parte aérea.

### **3.2.6 Determinação do teor de proteína**

Foi determinado o teor de proteína bruta conforme método descrito por Galvani e Gaertner (2006). Inicialmente realizou-se análise de nitrogênio pelo princípio de Kjeldahl, que consiste na digestão sulfúrica do material vegetal na presença do sulfato de cobre pelo e digestão da amostra a 400°C, seguido da destilação e posterior titulação com ácido. Para a conversão de proteína bruta, multiplica-se o valor do nitrogênio total encontrado pelo método de Kjeldahl pelo fator 6,25.

## **3.3 Análise estatística**

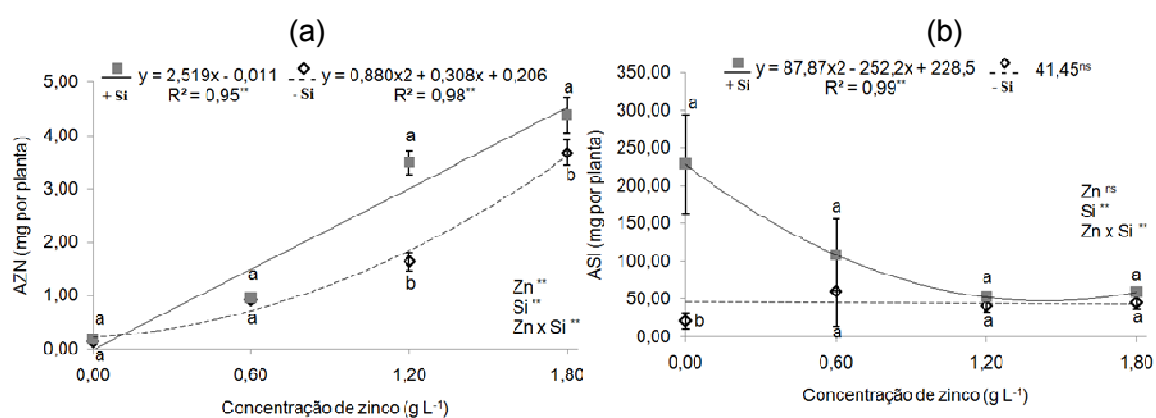
Os dados foram submetidos à análise de variância ( $p < 0,05$ ). Quando o teste F foi significativo, as médias das concentrações de Si foram comparadas pelo teste t de Student (LSD), e as concentrações de Zn, por meio da análise de regressão polinomial (Barbosa e Maldonado Júnior, 2010).

## 4 RESULTADO

### 4.1 Acúmulo de silício e zinco

O acúmulo de Zn na planta (AZN) depende das concentrações de Zn e de Si pulverizadas (Figura 3a). O AZN aumentou com as concentrações de Zn especialmente nas duas maiores concentrações (1,20 e 1,80 g L<sup>-1</sup> de Zn), destacando-se as plantas com a adição de Si na calda em relação a sua ausência.

Para o acúmulo de silício (ASI), houve interação das concentrações de Zn e de Si (Figura 3b). Verificou-se decréscimo quadrático do acúmulo de Si nas plantas em função do aumento das concentrações de Zn pulverizadas na presença de Si na calda. Nas plantas sem a pulverização de Zn (0 g L<sup>-1</sup>), a adição de Si (0,50 g L<sup>-1</sup>) na calda proporcionou o maior acúmulo do elemento benéfico na parte aérea, atingindo aumento de 91% em relação às plantas que não receberam pulverização com Si na calda.

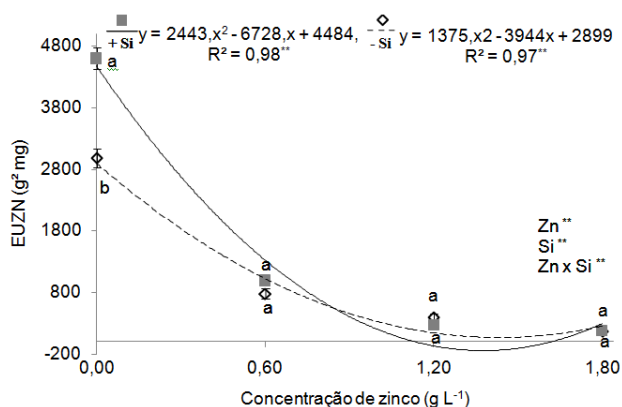


**Figura 3.** Acúmulo de zinco (AZN) (a) e acúmulo de silício (ASI) (b) em função das concentrações de Zn na ausência e na presença de Si (0,50 g L<sup>-1</sup>). \*\* significativo a 1% de probabilidade; \* significativo a 5% de probabilidade e não significativo. Letras diferentes diferem em relação às concentrações de Si, usando o teste t de Student. Barras nos pontos representam o erro padrão da média.



## 4.2 Eficiência de uso de zinco

O aumento das concentrações de Zn pulverizadas na ausência e na presença de Si na calda diminuiu a eficiência de uso do Zn atingindo ponto de mínimo na concentração de Zn de 1,43 e 1,37 g L<sup>-1</sup>, respectivamente (Figura 4.). Nas plantas controle na concentração 0 g L<sup>-1</sup> de Zn que receberam Si na calda em relação a sua ausência promoveu maior eficiência de uso do micronutriente.



**Figura 4.** Eficiência de uso de zinco em função das concentrações de Zn na ausência e na presença de Si (0,50 g L<sup>-1</sup>). \*\* significativo a 1% de probabilidade; \* significativo a 5% de probabilidade e não significativo. Letras diferentes diferem em relação às concentrações de Si, usando o teste t de Student. Barras nos pontos representam o erro padrão da média.

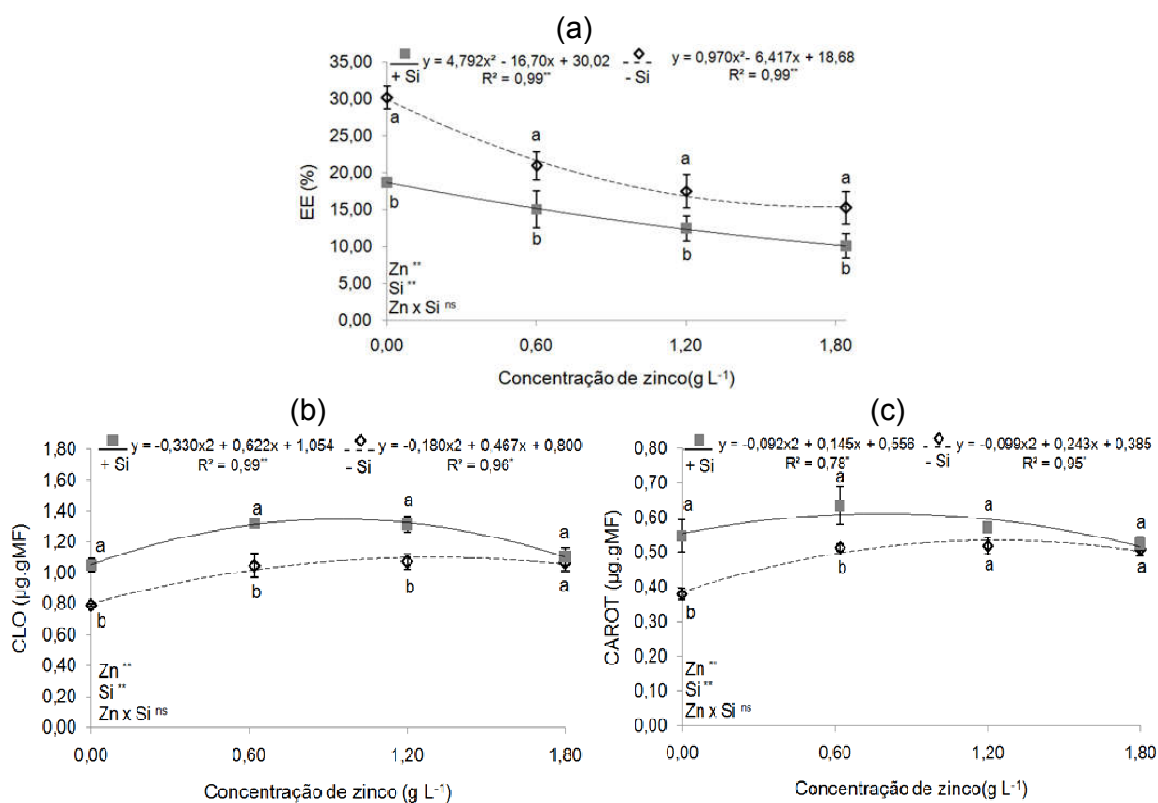
## 4.3 Extravasamento de eletrólitos celular, clorofila e carotenoide

Verificou-se decréscimo com ajuste quadrático no extravasamento de eletrólitos celular (EE) com aumento da concentração de Zn, na ausência e na presença de Si na calda. (Figura 5a). Na presença de Si o EE foi sempre menor em relação a sua ausência. Nas plantas controle, na ausência da pulverização de Zn, a adição de Si na calda diminuiu em 30% o EE, comparada as plantas sem adição do elemento benéfico.

O incremento das concentrações de Zn, na ausência e na presença de Si na calda, promoveu incremento com ajuste quadrático no teor de clorofila (CLO) (Figura 5b). As plantas que receberam Si, em relação às na ausência de aplicação,

apresentaram maior CLO em todas as concentrações de Zn, exceto na maior concentração do micronutriente (1,80 g L<sup>-1</sup>). Observou-se que o maior valor CLO ocorreu com pulverização de Zn na presença de Si, em concentração do micronutriente inferior (0,94 g L<sup>-1</sup> de Zn), em relação à calda com a ausência deste elemento benéfico (1,29 g L<sup>-1</sup> de Zn).

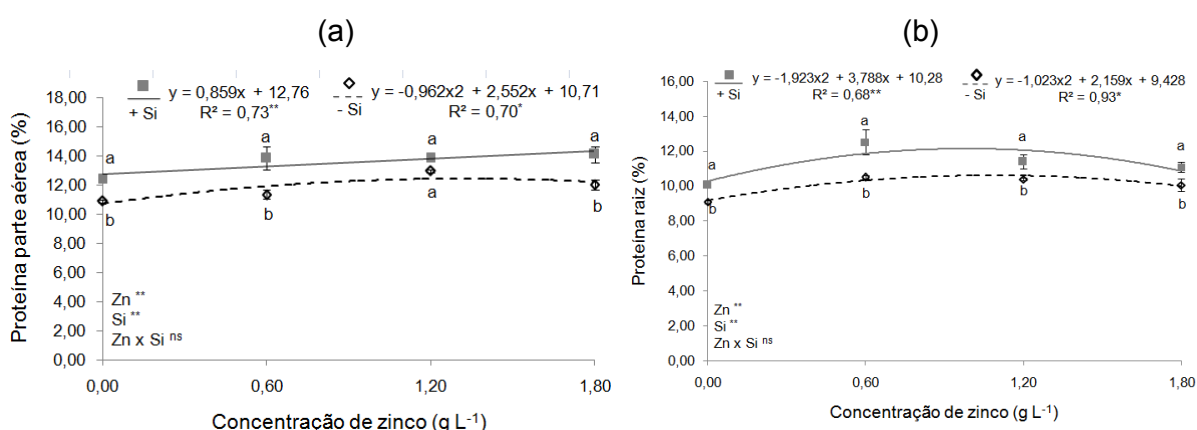
A pulverização foliar de Zn, independentemente do Si na calda, aumentou o teor de carotenoides (CAROT) das folhas, mas atingiu valor máximo na concentração de 0,78 g L<sup>-1</sup> de Zn na presença de Si (Figura 5c). Nas plantas pulverizadas com 0 g L<sup>-1</sup> de Zn, e com 0,60 g L<sup>-1</sup> de Zn a adição de Si na calda, em relação a sua ausência, promoveu aumento do teor de CAROT.



**Figura 5.** Extravasamento de eletrólitos celulares (EE) (a), clorofila (CLO) (b), carotenoides (CAROT) (c) em função das concentrações de Zn, na ausência e presença de Si (0,50 g L<sup>-1</sup>). \*\* significativo a 1% de probabilidade; \* significativo a 5% de probabilidade e não significativo. Letras diferentes diferem em relação às concentrações de Si, usando o teste t de Student. Barras nos pontos representam o erro padrão da média.

#### 4.4 Teor de proteína

O teor de proteína na parte aérea aumentou linearmente nas plantas de sorgo que receberam pulverização foliar de Zn, na presença do Si. As concentrações de Zn com 0, 0,60 e 1,80 g L<sup>-1</sup> de Zn apresentaram diferença estatística em relação à ausência de Si na calda (Figura 6a). Para o teor de proteína nas raízes (RPR), houve efeito das concentrações de Zn e de Si aplicados via foliar (Figura 6b). A concentração de Zn que promoveu maior RPR foi a 0,60 g L<sup>-1</sup>, na presença do Si na calda de pulverização.

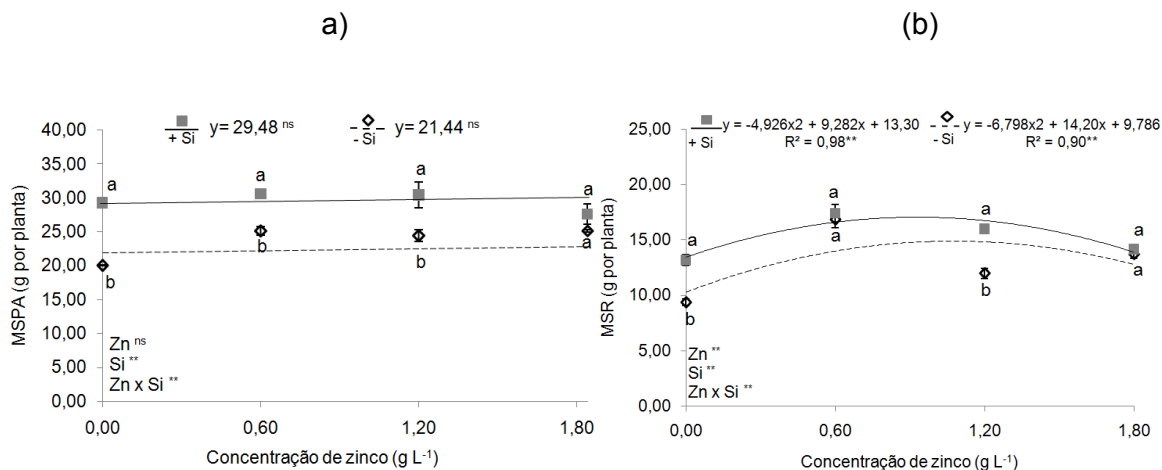


**Figura 6.** Teor de proteína na parte aérea (a), teor de proteína na raiz (b), em função das concentrações de Zn na ausência e na presença de Si (0,50 g L<sup>-1</sup>). \*\* significativo a 1% de probabilidade; \* significativo a 5% de probabilidade e não significativo. Letras diferem em relação às concentrações de Si, usando o teste t de Student. Barras nos pontos representam o erro padrão da média.

#### 4.5 Massa seca

Apesar da pulverização foliar de Zn não ter afetado a produção de massa seca da parte aérea (MSPA), a adição de Si na calda em relação a sua ausência incrementou em 32%, 18% e 20% a massa seca de raiz nas concentrações de Zn com 0,00; 0,60 e 1,20 g L<sup>-1</sup>, respectivamente (Figura 7a). O aumento das concentrações de Zn pulverizadas, na ausência e também na presença de Si na calda, promoveram incremento com ajuste quadrático na massa seca de raiz das plantas de sorgo (Figura 7b). Observou-se que a pulverização foliar de Zn na

concentração de  $1,04 \text{ g L}^{-1}$ , com a presença de Si na calda, resultou maior produção. Nas plantas-controle, na concentração de  $0 \text{ g L}^{-1}$  de Zn, a presença de Si na calda em relação a sua ausência aumentou a produção de massa seca de raiz em 41%.



**Figura 7.** Massa seca de parte aérea (MSPA) (a), massa seca de raiz (MSR) (b), em função das concentrações de Zn na ausência e na presença de Si ( $0,50 \text{ g L}^{-1}$ ). \*\* significativo a 1% de probabilidade; \* significativo a 5% de probabilidade e não significativo. Letras diferentes diferem em relação às concentrações de Si, usando o teste t de Student. Barras nos pontos representam o erro padrão da média.

## 5 DISCUSSÃO

O maior AZN em função das maiores concentrações de Zn, na ausência e na presença de Si na calda, foi favorecido pela biodisponibilidade do Zn na forma de quelato, que proporcionou sua absorção pelas folhas (Mocellin, 2004). Ficou evidenciado que a adição de Si na calda, especialmente nas maiores concentrações de Zn pulverizadas, aumentou o AZN em plantas de sorgo. Este efeito, possivelmente, deve-se ao efeito de interação sinérgica entre o Si e o Zn, o que contribuiu para o aumento da absorção do Zn nas plantas (Ghasemi et al., 2014). E também, ao fato de o Si ter papel importante no transporte deste micronutriente para o vacúolo nas células vegetais (Marschner et al., 1990; Shedeed, 2018). Este estudo evidencia de forma inédita que é viável a calda com Zn e Si para pulverização foliar, pois potencializou a absorção do micronutriente em relação à

absorção de Si. Portanto, surge nova estratégia para a otimização da adubação foliar de Zn em plantas de sorgo.

A deficiência de Zn induz distúrbios fisiológicos, como o aumento das ERO, que causam degradação das membranas celulares, havendo efluxo do citossol para espaço livre aparente, aumentando os valores do índice de EE (Alloway, 2008), degradação dos pigmentos de clorofila e de carotenoides (Hafeez et al., 2013; Sourestani e Ansari, 2017) e diminuindo a síntese de proteínas (Marschner, 2012). Assim, o decréscimo do EE, em função do aumento das concentrações de Zn pulverizadas nas folhas, provavelmente, ocorreu devido à diminuição das ERO que causam degradação dos ácidos nucleicos, proteínas e lipídeos de membranas (Bailey e Mittler, 2006), evitando a degradação dos pigmentos foliares. Portanto, este efeito da pulverização foliar de Zn no aumento do teor de clorofila já foi relatado por outros autores (Rezaei e Abbasi, 2014; Sourestani e Ansari, 2017) que não adicionaram Si na calda.

A adição de Si na calda de pulverização, nas plantas sem o fornecimento de Zn, foi benéfica para a planta por diminuir EE e aumentar os pigmentos de clorofila e de carotenoides foliares de plantas de sorgo. Isso ocorreu porque o Si ativa enzimas antioxidantes e também induz síntese de antioxidante não enzimático, que seriam os carotenoides diminuindo ação de degradação de membranas (Kim et al., 2017); conseqüentemente, diminuiu o EE favorecendo o incremento dos pigmentos foliares (Cao et al., 2015). Resultados semelhantes foram obtidos por outros autores com a pulverização foliar de Si sem adição de Zn, sendo verificado incremento dos teores de clorofila foliar de plantas de milho (Shedeed, 2018) e de carotenoides em plantas de batata (Pilon et al., 2013).

Ficou evidenciado que a pulverização foliar com Zn, na ausência ou na presença de Si na calda, favoreceu a produção de massa seca de raiz em relação à parte aérea. Resultados semelhantes foram obtidos em tamareira (Mohammadi e Khezri, 2018) e em feijoeiro (Mahdiehet et al., 2018) verificando-se que a pulverização foliar de Zn na forma de quelato promoveu maior crescimento do sistema radicular da planta. Isso pode ser indicativo de que o Zn na forma de quelato é importante para o transporte a longa distância dentro do floema, favorecendo o crescimento das raízes (Hernández-Apaolaza, 2014). Foi verificado que o Zn

pulverizado nas folhas incrementou a síntese de proteína, possivelmente devido aumento do conteúdo de RNA e divisão celular (Alloway, 2008), e aumento do número de ribossomo celular (Marschner, 2012) associado ao aumento do AIA (Soleymani e Shahrajabian, 2012; Mohammadi e Khezri, 2018), favorecendo acúmulo de biomassa.

O benefício da pulverização de Zn na forma de quelato, especialmente com adição de Si na calda em relação a sua ausência na produção de massa seca de raiz, ocorreu devido ao aumento no acúmulo de Zn na planta e também dos teores dos pigmentos fotossintetizantes. Este resultado reforça a viabilidade da adição de Si na calda para potencializar a resposta da adubação foliar com Zn em plantas de sorgo.

Nas plantas-controle, sem o fornecimento de Zn, a pulverização foliar de Si aumentou a produção de massa seca da parte aérea e da raiz, e acúmulo de Si, fato também observado em plantas de sorgo (Flores et al., 2018) e em plantas de morango (Wang e Galletta, 1998). Este efeito benéfico da pulverização foliar de Si em plantas controle (deficiente de Zn), na produção de massa seca, ocorreu devido à diminuição do EE e ao aumento dos pigmentos fotossintéticos e do teor de proteína na parte aérea, favorecendo o aumento da eficiência de uso do Zn residual da planta. O Zn residual seria o elemento presente na semente que foi absorvido na fase inicial de crescimento da planta. Assim, a presença de Si na calda propiciou melhora na eficiência de conversão do Zn residual em biomassa (Hernandez-Apaolaza, 2014). Portanto, ficou claro que o Si diminui os efeitos prejudiciais da deficiência de Zn, conforme constatado por outros autores em plantas de soja (Pascual et al., 2016) e de pepino (Bityutskii et al., 2014).

As hipóteses da pesquisa foram aceitas, sugerindo nova estratégia para potencializar os efeitos da adubação foliar de Zn nos cultivos a partir da adição de Si na calda de pulverização. Os efeitos positivos da junção do Si com o Zn nas plantas de sorgo ocorreram justamente pela estabilidade da calda e não polimerização do Si longas cadeias na aplicação, o que poderia inviabilizar a absorção tanto do Si, quanto do Zn pelas plantas. O sucesso da junção desses elementos é demonstrado de forma inédita nesse trabalho, surgindo assim uma alternativa mais econômica para o produtor.

## 6 CONCLUSÃO

A pulverização foliar de Si alivia os efeitos da deficiência de Zn. A adição de Si na calda com o Zn, na forma de quelato, é viável agronomicamente para plantas de sorgo por aumentar o acúmulo de Zn e os teores dos pigmentos fotossintetizantes, além de promover maior acúmulo da massa seca da raiz e diminuir o extravasamento de eletrólitos celular. A composição da calda recomendada para aplicação em plantas de sorgo é a concentração  $1,00 \text{ g L}^{-1}$  de Zn na presença de  $0,50 \text{ g L}^{-1}$  de Si.

## REFERÊNCIAS

Aaron B, Ron M, Nobuhiro S (2014) ROS as key players in plant stress signalling. **Journal Experimental Botany**, 65:1229–1240.

Ahmad A, Afzal M, Ahmad AUH, Tahir M (2013) Effect of foliar application of silicon on yield and quality of rice (*Oryza sativa* L). **Cercetari Agronomice in Moldova**, 46:21-28.

Alloway BJ (2008) **Zinc in Soils and Crop Nutrition**. International Zinc Association, Brussels, Belgium, 135 p.

Alvarez RCF, Prado RM, Souza Júnior JP, Oliveira RLL, Felisberto G, Deus ACF, Cruz FJR (2019). Effects of foliar spraying with new zinc sources on rice seed enrichment, nutrition, and productivity. **Acta Agricultura e Scandinavica, Section B—Soil & Plant Science**, 1-5.

Apel K, Hirt H (2004) Reactive oxygen species: metabolism, oxidative stress, and signal transduction. **Annual Review of Plant Biology**, 55:373–399.

Babiker AGT, Duncan HJ (1974) Penetration of bracken fronds by asulam as influenced by the addition of surfactant to the spray solution and by pH. **Weed Research**. 14:375-378.

Bailey JS, Mittler R (2006) The role of reactive oxygen species in plant cells. **Plant Physiology**.141:311.

Balakhnina T, Borkowska A (2013) Effects of silicon on plant resistance to environmental stresses: review. **International Agrophysics**.; 27:225-232.

Barbosa JC, Maldonado Júnior W (2010) **AgroEstat: sistema para análises estatísticas de ensaios agrônômicos**. Jaboticabal: Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Unesp.

Bataglia OC, Teixeira, JPF, Furlani PR, Furlani AMC, Gallo JR (1983) **Métodos de análise química de plantas**. Campinas, Brasil, 48 p. (Instituto Agrônômico de Campinas –boletim técnico, 78).



Bityutskii N, Pavlovic J, Yakkonen K, Maksimović V, Nikolic M (2014) Contrasting effect of silicon on iron, zinc and manganese status and accumulation of metal-mobilizing compounds in micronutrient-deficient cucumber. **Plant Physiology and Biochemistry**, 74:205-211.

Bokor B, Vaculík M, Slováková L, Masarovič D, Lux A (2014) Silicon does not always mitigate zinc toxicity in maize. **Acta Physiologia and Plantarum**, 36:733-743.

Burt CM, O'Connor K; Ruehr T (1995) **Fertigation**. San Luis Obispo: Irrigation Training and Research Center/California Polytechnic State University, 295 p.

Canesin RCFS, Buzetti S (2007) Efeito da aplicação foliar de boro e zinco sobre a produção e os teores de SST e ATT dos frutos da pereira-japonesa e da pinheira. **Revista Brasileira de Fruticultura**, 29:377-381.

Cao B, Ma Q, Zhao Q, Wang L, Xu K (2015) Effects of silicon on absorbed light allocation, antioxidant enzymes and ultrastructure of chloroplasts in tomato leave under simulated drought stress. **Scientia Horticulturae**, 194:53–62.

Choudhary SK, Jat MK, Mathur AK (2017) Effect of micronutrient on yield and nutrient uptake in sorghum. **Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry**, 6:105-108.

Choudhary SK, Mathur AK, Singh P (2015) Effect of micronutrient fertilization and methods of application on yield and quality of sorghum (*Sorghum bicolor*) in sub-humid southern plains zone. **Research on Crops**, 16:59-63.

Companhia Nacional De Abastecimento - CONAB. (2019) **Acompanhamento de safra brasileira de grãos, Safra 2018/19: Sexto levantamento**. Brasília: Conab, 69 p.

Coskun D, Britto DT, Huynh WQ, Kronzucker HJ (2016) The role of silicon in higher plants under salinity and drought stress. **Frontiers in Plant Science**, 7:1072.

Curvelo CRS, Rodrigues FÁ, Pereira LF, Silva LC, DaMatta F.M, Berger PG (2013) Trocas gasosas e estresse oxidativo em plantas de algodoeiro supridas com silício e infectadas por *Ramularia areola*. **Bragantia**, 72:346-359.

Dambiwal D, Katkar RN, Kumawat KR, Hakla CR, Bairwa B, Kumar K, Lakhe SR (2017) Effect of soil and foliar application of zinc on sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) yield, agronomic efficiency and apparent recovery efficiency. **IJCS**, 5:435-438.

Dargahi M, Sadrabadi HR, Bakhsh KK (2014) Effect of zinc chelate foliar application on yield and yield components of four wheat cultivars. **Ikufiziyuluzhī-i Giyāhān-i Zirāī**, 8:137-148.

De Lima Filho OF (2014) **Guia de diagnose visual de deficiências nutricionais em sorgo-sacarino**. (Embrapa Agropecuária Oeste-Circular Técnica, 31) 14 p.

De Lima Filho OF, Silva MS, Oliveira Vareiro WP, Zanutto RP (2018) **Limpeza de areia para experimentos em nutrição de plantas**. (Embrapa Agropecuária Oeste-Comunicado Técnico, 232) 5 p.

Dimkpa CO, White JC, Elmer WH, Gardea-Torresdey J (2017) Nanoparticle and ionic Zn promote nutrient loading of sorghum grain under low NPK fertilization. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, 65:8552-8559.

Doolette CL, Read TL, Li C, Scheckel KG, Donner E, Kopittke PM, Schjoerring JK, Lombi E (2018) Foliar application of zinc sulphate and zinc EDTA to wheat leaves: differences in mobility, distribution, and speciation. **Journal of Experimental Botany**, 69:4469-4481.

Duarte J (2010) **A produção de sorgo granífero no Brasil**. Sistema de produção, (Embrapa Milho e Sorgo 2), 13 p.

Felisberto G (2018) **Silício na mitigação de estresse por deficiência de zinco em plantas de arroz e soja**. 63 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Unesp, Jaboticabal.

Ferraz RLDS, Magalhães ID, Beltrão NEDM, Melo ASD, Neto B, Rocha MDS (2015) Photosynthetic pigments, cell extrusion and relative leaf water content of the castor bean under silicon and salinity. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, 19:841-848.

Flores RA, Arruda EM, Damin V, Junior JPS, Maranhão DDC, Correia MAR, Prado RM (2018) Physiological quality and dry mass production of *Sorghum bicolor* following silicon (Si) foliar application. **Australian Journal of Crop Science**, 12:631-638.

França AAD (2014) **Aproveitamento das cinzas de casas de arroz como matéria-prima para o preparo de carvão ativado e de fertilizantes minerais de silício e potássio**. 132 f. Dissertação (Mestrado em Química) Universidade federal do Paraná, Curitiba.

Franco AAN (2011) **Marcha de absorção e acúmulo de nutrientes na cultura do sorgo**. 78 f. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) Minas Gerais: Universidade Estadual de Montes Claros, Janaúba.

Fryer MJ (1992) The antioxidant effects of thylakoid vitamin E ( $\alpha$ -tocopherol). **Plant, Cell & Environment**, 15:381–392.

Fu XZ, Xing F, Cao L, Chun CP, Ling LL, Jiang CL, Peng LZ (2016) Effects of foliar application of various zinc fertilizers with organo silicone on correcting citrus zinc deficiency. **Hortscience**, 51:422-426.

Galvani F, Gaertner E. (2006) **Adequação da metodologia Kjeldahl para determinação de nitrogênio total e proteína bruta**. Embrapa Pantanal-Circular Técnica (INFOTECA-E), 9 p.

Galvão EZ (1994) Métodos de correção da deficiência de zinco para o cultivo do milho num Latossolo Vermelho-Escuro argiloso sob cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 18:229-233.

García PCO, Parra SJM, Sánchez E, Márquez ME, Ramírez, PFJ, Flores-Córdova, MA, Yáñez-Muñoz RM (2019). Efficiency of nanoparticle, sulfate, and zinc-chelate use on biomass, yield, and nitrogen assimilation in green beans. **Agronomy**, 9:128.

Ghasemi ML, Normohamadi G, Madani H, Sharifabad HH, Mobasser HR (2014) Effect of silicon and potassium foliar application and nitrogen rates on yield and yield components of Iranian rice cultivars, TaromHashemi and TaromMahalli. – **Journal of New Finding in Agriculture**, 9:47-66.

Gonçalves FAR, Xavier FO, Oliveira TF, Júnior JDDG, de Aquino LA (2017) Aplicação foliar de doses e fontes de cobre e manganês nos teores foliares destes micronutrientes e na produtividade da soja. **Cultura Agrônômica: Revista de Ciências Agrônômicas**, 26:384-392.

Gonzalo MJ, Lucena JJ, Hernandez-apaolaza L (2013) Effect of silicon addition on soybean (*Glycine max*) and cucumber (*Cucumis sativus*) plants grown under iron deficiency. **Plant Physiology Biochemistry**, 70:455–461.

Gowayed SM, Al-Zahrani HS, Metwali EM (2017) Improving the Salinity tolerance in potato (*Solanum tuberosum*) by exogenous application of silicon dioxide nanoparticles. **Journal of Agricultural Biological**, 19:183–194.

Gu HH, Zhan SS, Wang SZ, Tang YT, Chaney RL, Fang XH, Qiu RL (2012) Silicon-mediated amelioration of zinc toxicity in rice (*Oryza sativa* L.) seedlings. **Plant and Soil**, 350:193-204.

Hafeez B, Khanif YM, Saleem M (2013) Role of zinc in plant nutrition-a review. **American Journal of Experimental Agriculture**, 3:374-391.

Halder T, Agarwal T, Ray S (2016) Isolation, cloning, and characterization of a novel Sorghum dehydrin (SbDhn2) protein. **Protoplasma**, 253:1475-1488.

Haslett S, Reid RJ, Rengel Z (2001) Zinc mobility in wheat: Uptake and distribution of zinc applied to leaves or roots. **Annals of Botany**, 87:379-386.

Hernandez-Apaolaza L (2014) Can silicon partially alleviate micronutrient deficiency in plants? A review. **Planta**, 240:447-458.

Hoagland DR, Arnon DI (1950) **The water-culture method for growing plants without soil**. California Agricultural Experiment Station, California, USA 2, 347 p.

Kabata-Pendias A (2011) **Trace elements in soils and plants**. Boca Raton: CRC Press/Taylor & Francis Group. 548 p.

Kandoliya RU, Sakarvadiya HL, BB K (2018) Effect of zinc and iron application on leaf chlorophyll, carotenoid, grain yield and quality of wheat in calcareous soil of Saurashtra region. **IJCS**, 6:2092-2096.

Katkar RN, Dambiwal D, Lakhe SR, Kharche VK, Age AB, Ghorade RB (2018). Agronomic bio-fortification of zinc in Sorghum (*Sorghum bicolor* L.) Genotypes. **Journal of The Indian Society of Soil Science**, 66:103-110.

Khan R, Gul S, Hamayun M, Shah M, Sayyed A, Ismail H, Gul H (2016) Effect of foliar application of zinc and manganese on growth and some biochemical constituents of *Brassica juncea* grown under water stress. **American-Eurasian Journal of Agricultural and Environmental Sciences**, 16:984-97.

Kim YH, Khan AL, Waqas M, Lee IJ (2017) Silicon regulates antioxidant activities of crop plants under abiotic-induced oxidative stress: a review. **Frontiers in Plant Science**, 8:1-7.

Kirkby EA, Römheld V (2007) Micronutrientes na fisiologia de plantas: funções, absorção e mobilidade. **Informações Agrônomicas**, 118:1-24.

Kollarova K, Kusa Z, Vatehova-Vivodova Z, Lišková D (2019) The response of maize protoplasts to cadmium stress mitigated by silicon. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, 170:488-494.

Korndörfer GH, Pereira HS, Nolla A (2004) **Análise de silício: solo, planta e fertilizante**. Uberlândia, Instituto de Ciências Agrárias, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Brasil, 34 p.

Korndörfer GH (2007) **Uso do Silício na agricultura**. (Informações agrônomicas), 117 p.

Kubicki JD, Heaney PJ (2003) Molecular orbital modeling of aqueous organo silicon complexes: Implications for silica biomineralization. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, 67:4113–4121.

Kumar K, Arvind K, Vidyasagar R, Rao K (1988) Studies on growth and activity of photosynthetic enzymes on *Sorghum bicolor* L. as influenced by micronutrients. **Proceedings of the National Sciences Academy**, 54:75-80.

Laane HM (2017) The effects of the application of foliar sprays with stabilized silicic acid: An overview of the results from 2003-2014. **Silicon**, 9:803-807.

Lee JS, Wissuwa M, Zamora OB, Ismail AM. (2017) Biochemical indicators of root damage in rice (*Oryza sativa*) genotypes under zinc deficiency stress. **Journal of Plant Research**. 130:1071–1077.

Liang Y, Sun W, Zhu YG, Christie P (2007) Mechanisms of silicon-mediated alleviation of abiotic stresses in higher plants: a review. **Environmental Pollution**, 147:422-428.

Lichtenthaler HK, Buschmann C (2001) Chlorophylls and carotenoids: measurement and characterization by UV-VIS spectroscopy. **Currente Protocols in Food Analytical Chemistry**, 4:1-8.

Liu H, Gan W, Rengel Z, Zhao P (2016) Effects of zinc fertilizer rate and application method on photosynthetic characteristics and grain yield of summer maize. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, 16:550-562.

Lopes GM, Peres AEC, Pereira CA, Antônio LM (2011) O emprego do silicato de sódio como dispersante/depressor na indústria mineral, **XXIV ENTMME** 285-291.

Ma JF, Yamaji N (2006) Silicon uptake and accumulation in higher plants. **Trends in Plant Science**, 11:392-397.

Mahdieh M, Sangi MR, Bamdad F, Ghanem A (2018) Effect of seed and foliar application of nano-zinc oxide, zinc chelate, and zinc sulphate rates on yield and growth of pinto bean (*Phaseolus vulgaris*) cultivars. **Journal of Plant Nutrition**, 41:2401-2412.

Maksimovic D, Mojovic M, Maksimovic V, Romheld V, Nikolic M (2012) Silicon ameliorates manganese toxicity in cucumber by decreasing hydroxyl radical accumulation in the leaf apoplast. **Jounal Experimental Botany**, 63:2411-2420.

Malavolta E (1993) **Nutrição mineral e adubação do cafeeiro: colheitas econômicas máximas**. São Paulo: Agronômica Ceres, 210 p.

Malavolta E (2006) **Manual de nutrição de plantas**. São Paulo, Ed. Agronômica Ceres, 638 p.

Marschner H, Oberle H, Cakmak I, Romheld V (1990) Growth enhancement by silicon in cucumber plants depends on imbalance in phosphorous and zinc supply. **Plant and Soil**, 124:211-219.

Marschner H (2012) **Mineral nutrition of higher plants**. London: Elsevier. 643 p.

Mehrabanjoubani P, Ahmad A, Hamid RS, Mahna A (2015) Impacts of silicon nutrition on growth and nutrient status of rice plants grown under varying zinc regimes. **Theoretica Land Experimental Plant Physiology**, 27:19-29.

Mocellin RS (2004) **Princípios da adubação foliar. Coletânea de dados e revisão bibliográfica**. Omega Fertilizantes, Canoas, Brasil, 83 p.

Mohammadi H, Khezri M (2018) The influence of foliar application of urea, zinc chelate and boric acid on growth characteristics, photosynthesis and survival of date palm offshoots (*Phoenix dactylifera* cv. Mazafati). **European Journal of Horticultural Science**, 83:114-120.

Montalvo D, Degryse F, Silva RC, Baird R, McLaughlin MJ (2016) Agronomic effectiveness of zinc sources as micronutrient fertilizer. **Advances in Agronomy**, 139:215-267.

Nascente AS, Mondo VHV, Gonzaga ACO, Carvalho MD, Lacerda MC (2017) Rates and timing of N foliar application as affecting grain yield of common bean. **Revista Agrarian**, 10:199-208.

Oliveira SMD, Pierozan Junior C, Lago BC, Almeida REMD, Trivelin PCO, Favarin JL (2019) Grain yield, efficiency and the allocation of foliar N applied to soybean canopies. **Scientia Agricola**, 76(4), 305-310.

Orioli Júnior V, Prado RM, Leonel CL, Cazetta DA, Silveira CM, Queiroz RBJ, Bastos HAG, Cristina J (2008) Methods of zinc application in the nutrition and production of wheat plant dry matter. **Revista de La Ciencia Del Suelo y Nutrición Vegetal**, 8:28-36.

Pacholczak A, Szydło W (2008) Effect of ammonium zinc acetate on rooting of stem cuttings in *Physocarpus opulifolius*. *Ann Warsaw Univ. Life Sciences - SGGW. Horticulture Landscape Architecture*, 29:59-64.

Pascual MB, Echevarria V, Gonzalo MJ, Hernández-Apaolaza L (2016) Silicon addition to soybean (*Glycine max* L.) plants alleviate zinc deficiency. **Plant Physiology and Biochemistry**, 108:132-138.

Pavlovic J, Samardzic J, Maksimović V, Timotijevic G, Stevic N, Laursen KH, Nikolic, M (2013) Silicon alleviates iron deficiency in cucumber by promoting mobilization of iron in the root apoplast. **New Phytologist**, 198:1096-1107.

Peruchi M (2009) **Aplicação de fontes de boro e zinco via foliar em culturas anuais**. 79 f. Tese (Doutorado em Agronomia) Unesp – Ilha Solteira.

Pilon C, Soratto RP, Moreno LA (2013) Effects of soil and foliar application of soluble silicon on mineral nutrition, gas exchange, and growth of potato plants. **Crop Science**, 53:1605-1614.

Pipíška M, Hornik M, Sekáčová J, Augustin J, Lesný J (2008) Influence of complexing ligands and mineral nutrients on zinc foliar uptake and translocation in vascular plants. **Cereal Research Communications**, 36:415-418.

Prado RM (2008): **Nutrição de plantas**. São Paulo: Editora Unesp. 408 p.

Prado RM, Romualdo LM, Rozane DE, Vidal ADA, Marcelo AV (2008) Modos de aplicação de zinco na nutrição e na produção de matéria seca do milho BRS 1001. **Bioscience Journal**, 24:67-74.

Qadir MA, Ahmed M, Ihsan N, Ahmad A, Waseem R (2014) EDTA chelated micronutrients for growth of rice, onion and lemon plants and enhancing their fruit yields. **International Journal Chemical Sciences**, 12:1153-1160.

Rabelo FHS, Rabelo CHS, Dupas E, Nogueira DA, Rezende AV (2012) Parâmetros agronômicos do sorgo em razão de estratégias de semeadura e adubação. **Applied Research & Agrotechnology**, 5:47-66.

Rana DS, Singh BHAGAT, Gupta K., Dhaka AK, Arya, SATYAWAN (2013) Response of fodder sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) to zinc and iron. **Forage Research**, 39:45-47.



Reddy AM, Kumar SG, Jyothsnakumari G, Thimmanaik S, Sudhakar C (2005) Lead induced changes in antioxidant metabolism of horse gram (*Macrotyloma uniflorum* (Lam.) Verdc.) and bengal gram (*Cicer arietinum* L.). **Chemosphere** 60:97–104.

Reynolds OL, Padula MP, Zeng R, Gurr GM (2016) Silicon: potential to promote direct and indirect effects on plant defense against arthropod pests in agriculture. **Frontiers in Plant Science**, 7:744.

Rezaei M, Abbasi H (2014) Foliar application of nanochelate and non-nanochelate of zinc on plant resistance physiological processes in cotton (*Gossypium hirsutum* L.). **Iran Journal Plant Physiology**, 4:1137-1144.

Rizwan M, Ali S, Ibrahim M, Farid M, Adrees M, Bharwana SA, Abbas F (2015) Mechanisms of silicon-mediated alleviation of drought and salt stress in plants: a review. **Environmental Science and Pollution Research**, 22:15416-15431.

Rooney W (2018) **Achieving sustainable cultivation of sorghum**. Volume 2: Sorghum utilization around the world. Burleigh Dodds Series in Agricultural Science Book 32, 243 p.

Samreen T, Shah HU, Ullah S, Javid M (2017) Zinc effect on growth rate, chlorophyll, protein and mineral contents of hydroponically grown mung beans plant (*Vigna radiata*). **Arabian Journal of Chemistry**, 10:1802-1807.

Santi A, Camargos SL, Pereira WLM, Scaramuzza JF (2005) Deficiências de micronutrientes em sorgo (*Sorghum bicolor*). **Revista de Ciências Agroambientais**, 3:54-63.

Santos FC, Coelho, AM, Resende AV, Menezes, CB, Rodrigues, JAS, Passos AMA, Albuquerque Filho MR, Santos RS (2018) Nutrição e adubação da cultura do sorgo. In **Nutrição e Adubação de Grandes Culturas**. Prado, RM, Campos, CNS (Eds). Jaboticabal: UNESP, 379 p.

Santos HC, Fraga VS, Raposo RW, Pereira WE (2009) Cu e Zn na cultura do sorgo cultivado em três classes de solos. I. Crescimento vegetativo e produção. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, 13:125-130.

Scotti Campos P, ThuPhanThi A. (1997) Effect of abscisic acid pretreatment on membrane leakage and lipid composition of *Vigna unguiculata* leaf discs subject to osmotic stress. **Plant Science**, 130:11-18.

Seraji Z, Abdolzadeh A, Sadeghipour HR (2017) Effects of silicon nutrition on growth and oxidative stress related parameters in rice plants exposed to moderate Zn toxicity. **Planta Persica**, 1:33-43.

Sharma PN, Kumar P, Tewari, RK (2004) Early signs of oxidative stress in wheat plants subjected to zinc deficiency. **Journal of Plant Nutrition**, 27:451–463.

Shedeed SI (2018) Assessing effect of potassium silicate consecutive application on forage maize plants (*Zea mays* L.). **Journal of Innovations in Pharmaceutical and Biological Sciences**, 5:119-127.

Siddiqi MY, Glass AD (1981) Utilization index: a modified approach to the estimation and comparison of nutrient utilization efficiency in plants. **Journal of Plant Nutrition**, 4:289-302.

Singh P, Aravindakshan K, Maurya IB, Singh J, Singh B, Sharma MK (2017) Effect of potassium and zinc on growth, yield and economics of sweet potato (*Ipomoea batatas* L.) cv. CO-34. **Journal of Applied and Natural Science**, 9:291-297.

Singh VP, Tripathi DK, Kumar D, Chauhan DK (2011) Influence of exogenous silicon addition on aluminium tolerance in rice seedlings. **Biological Trace Element Research**, 144:1260-1274.

Soleymani A, Shahrajabian MH (2012) The effects of Fe, Mn and Zn foliar application on yield, ash and protein percentage of forage sorghum in climatic condition of Esfahan. **International Journal of Biology**, 4:92-96.

Sourestani MM, Ansari NA (2017) Effects of foliar application of nano zinc chelate and zinc sulfate on zinc content, pigments and photosynthetic indices of holy basil (*Ocimum sanctum*). **Majallah-i Ulum-i Bāghbānī**, 30:242-250.

Sun Z, Xiong T, Zhang T, Wang N, Chen D, Li S (2019) Influences of zinc oxide nanoparticles on *Allium cepa* root cells and the primary cause of phytotoxicity. **Ecotoxicology**, 28:175-188.

Swamy BPM, Rahman MA, Inabangan-Asilo MA, Amparado A, Manito C, Chadha-Mohanty P, Reinke R, Slamet-Loedin IH (2016) Advances in breeding for high grain zinc in rice. **Rice**. 9:49.

Tabãna BS, Heckman JR (2015) Silicon in soils and plants. In Rodrigues FA, Dantnoff LE (Eds.) Silicon and plant diseases. **Springer International Publishing**, 7-51.

Taiz L, Zeiger E (2015) **Fisiologia vegetal**. Porto Alegre: Artmed, 719 p.

Tian S, Lu L, Xie R, Zhang M, Jernstedt J, Hou D, Brown P (2015) Supplemental macronutrients and microbial fermentation products improve the uptake and transport of foliar applied zinc in sunflower (*Helianthus annuus* L.) plants. Studies utilizing micro X-ray fluorescence. **Frontiers in Plant Science**, 5:808.

Timotiwu PB, Nurmauli N, Yulianti P (2017) Application of manganese and silica through leaves and their effect on growth and yield of rice in rice field in village of sinar agung, sub-district of Pulau Panggung, district of Tanggamus, Lampung Province, Indonesia. **MAYFEB Journal of Agricultural Science**, 4:48-60.

Wang M, Gao L, Dong S, Sun Y, Shen Q, Guo S. (2017) Role of silicon on plant-pathogen interactions. **Frontiers in Plant Science**, 8:701.

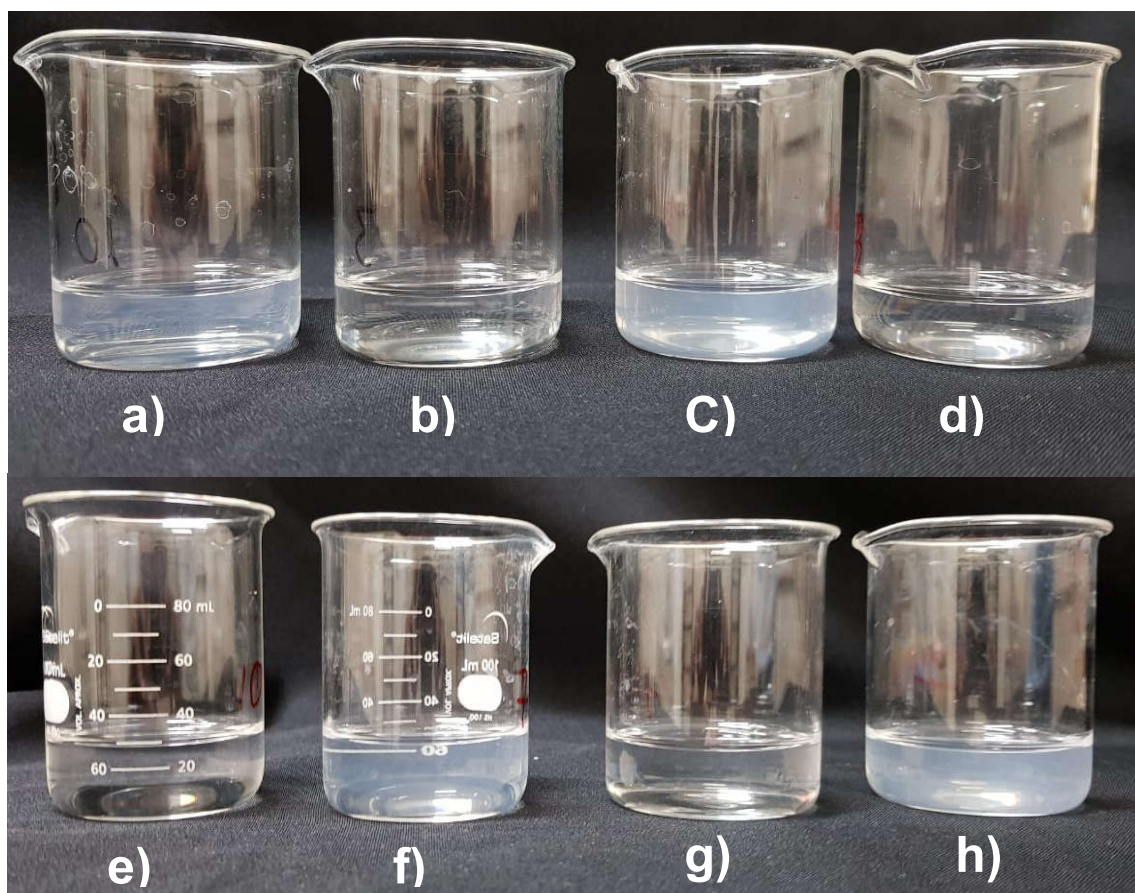
Wang S, Wang F, Gao S (2015) Foliar application with nano-silicon alleviates Cd toxicity in rice seedlings. **Environmental Science and Pollution Research**, 22:2837-2845.

Wang SY, Galletta GJ (1998) Foliar application of potassium silicate induces metabolic changes in strawberry plants. **Journal of Plant Nutrition**, 21:157-167.

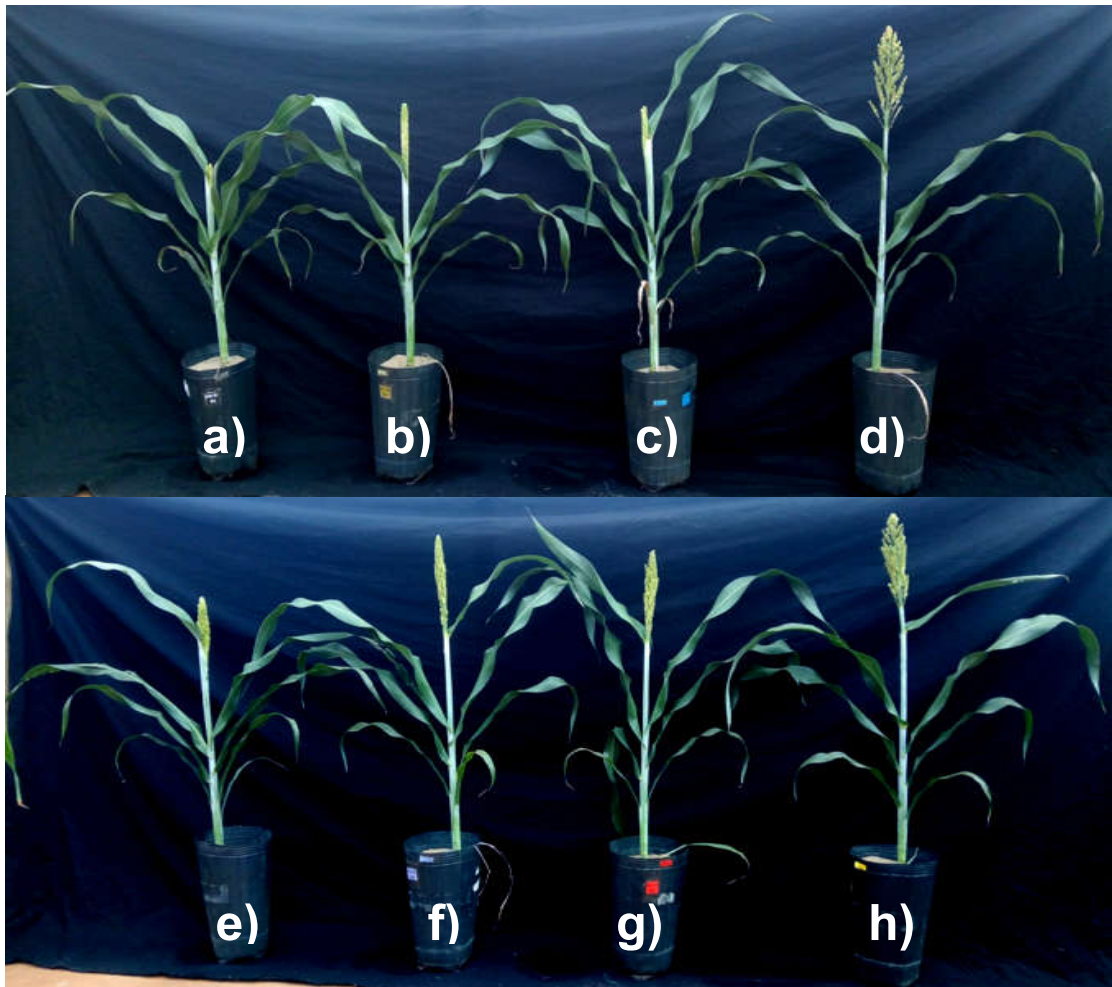
Yadav SK (2010) Heavy metals toxicity in plants: an overview on the role of glutathione and phytochelatins in heavy metal stress tolerance of plants. **South African Journal Botany**, 76:167–179.

Yin L, Wang S, Tanaka K, Fujihara S, Itai A, Den X, Zhang S (2016) Silicon-mediated changes in polyamines participate in silicon-induced salt tolerance in *Sorghum bicolor* L. **Plant, Cell & Environment**, 39:245-258.

## ANEXOS



**Figura 1.** Fotos da turbidez da solução com concentrações de Zn  $0 \text{ g L}^{-1}$  na presença do Si. (a), Zn  $0 \text{ g L}^{-1}$  na ausência do Si. (b); Zn  $0,60 \text{ g L}^{-1}$  na presença do Si. (c), Zn  $0,60 \text{ g L}^{-1}$  na ausência do Si. (d); Zn  $1,20 \text{ g L}^{-1}$  na ausência do Si. (e), Zn  $1,20 \text{ g L}^{-1}$  e na presença do Si (f); Zn  $1,80 \text{ g L}^{-1}$  na ausência do Si. (g), Zn  $1,80 \text{ g L}^{-1}$  na presença do Si (h) realizadas 180 min após a formação da solução.



**Figura 2A.** Fotos das plantas de sorgo nas concentrações Zn 0 (a), 0,60 (b); 1,20 (c), e 1,80 g L<sup>-1</sup> (d) na ausência do Si e 0 (e), 0,60 (f); 1,20 (g) e 1,80 g L<sup>-1</sup> (h) na presença do Si (0,50 g L<sup>-1</sup>) realizada no final do experimento.